



PROJETO DE GRADUAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA O DESLOCAMENTO DO CONSUMO DOS REFRIGERADORES DURANTE A DEMANDA DE PONTA

Por,

Felipe Borges F. de Lima

Henrique Ramos Pereira

Brasília, 8 de Junho de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE DE REFRIGERADORES
DOMÉSTICOS PARA REDUÇÃO DA DEMANDA
ELÉTRICA DE PONTA**

Por,
Felipe Borges F. de Lima
Henrique Ramos Pereira

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Taygora Felamingo de Oliveira (Orientador)

Prof. Mario Olavo M. Carvalho

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras

Brasília, 8 de Junho de 2012

A todos aqueles que contribuíram para formar a pessoa que sou hoje.

Felipe Borges.

A meus pais Valéria e Humberto, a família Ramos e Pereira.

Henrique Pereira.

Agradecimentos

Agradeço à minha família, pais e irmã, por apesar de tudo sempre me apoiarem e estarem presentes nos momentos mais importantes. Agradeço também aos meus familiares de Recife, Brasília e Rio de Janeiro por sempre incentivar e apoiar minhas decisões ao longo desses anos.

A meus amigos, Bruno Rodrigues e Yuri Carvalho, pelas viagens feitas durante o ano na França. E também aos amigos, Moisés Uchoa, Luciano Santos, Felipe Borges, Neil Martins, André Brandão, Marcel Vítor, Álvaro Campos e Thiago Carneiro, pelos momentos compartilhados durante a graduação.

Ao meu professor Edgar Mamiya por me ensinar que honestidade, seriedade e disciplina são fundamentais em um qualquer trabalho.

Henrique Pereira.

RESUMO

O trabalho relatado neste documento apresenta a metodologia utilizada e os resultados obtidos para o desenvolvimento de um equipamento que propõe um método para o deslocamento da carga elétrica de pico referente aos refrigeradores domésticos. São expostos os dados que permitiram a realização do diagnóstico, a teoria envolvida no funcionamento do equipamento, o desenvolvimento e teste do mesmo.

ABSTRACT

The study presented in this report shows the methodology and the obtained results for the design of an equipment aimed at shifting the daily peak demand of electricity referent to the domestic refrigerators. In this work the data that allowed the diagnostic of the opportunity are presented alongside with the theory that concerns it's working principles and also the results of the design and the testing of the equipment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 DIAGNÓSTICO	1
1.2 OPORTUNIDADE ENCONTRADA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ROTEIRO E METODOLOGIA.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 PANORAMA DA OFERTA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	7
2.1.1 Divisão da demanda de energia elétrica	9
2.1.2 Modelos para previsão do parque de refrigeradores nacional.....	10
2.1.3 O Brasil e a Eficiência Energética	173
2.1.4 A demanda de ponta.....	186
2.1.5 Medidas atuais para controle da demanda de ponta	188
2.2 REFRIGERADORES DOMÉSTICOS	20
2.2.1 Princípio de Funcionamento.	233
2.2.2 Eficientização.....	27
2.2.3 Controle.....	29
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE.....	30
2.3.1 Introdução.	30
2.3.2 Tipos de sistema de controle.....	31
2.3.3 Controladores Automáticos.	32
2.3.4 Controladores <i>on/off</i>	34
3. EQUIPAMENTO PROPOSTO	36
3.1 CONCEITO	36
3.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE	39
3.2.1 Modo de aprendizado.....	40
3.2.2 Modo normal.	41
3.3 HARDWARE.....	43
3.3.1 Como o equipamento irá reconhecer se o compressor está on ou off.....	44

3.3.2 Como saber que horas cada atividade foi realizada	46
3.3.3 Como realizar a comunicação entre computador e microprocessador	48
3.3.4 Como o equipamento irá acionar e desligar o compressor.....	50
3.3.5 Microprocessador e plataforma de desenvolvimento.....	51
3.3.6 Montagem final em Protoboard e componentes utilizados	53
3.4 SOFTWARE.....	56
4. TESTES, SIMULAÇÕES E ANÁLISES	57
4.1 TESTE DO MICROPROCESSADOR, RTC E PORTA SERIAL	57
4.2 TESTE DO RELÉ	59
4.3 TESTES PARA IDENTIFICAR ACIONAMENTO DO COMPRESSOR.....	60
4.4 TESTE DE VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO	62
4.4.1 Modo de Aprendizado com Relógio do Microprocessador.....	62
4.4.2 Modo de Aprendizado com Relógio do RTC.....	65
4.4.3 Modo Normal com Relógio do Microprocessador.....	66
4.4.4 Modo Normal com Relógio do RTC	68
4.4.5 Modo Completo com Relógio do Microprocessador	69
5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E CONCLUSÃO.....	70
5.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	70
5.2 CONCLUSÃO.....	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

LISTA DE FIGURAS

2.1	Oferta interna de energia elétrica por fonte - 2010.	7
2.2	Evolução da Produção de Energia Elétrica e Capacidade Instalada no País.....	8
2.3	Evolução do Consumo de Energia Elétrica por Setor	9
2.4	Evolução da Oferta e Consumo de Energia Elétrica no País.....	9
2.5	Perfil do Consumo Residencial	10
2.6	Percentual de refrigeradores em residências por região	10
2.7	Distribuição percentual dos refrigeradores no Brasil em função da idade.....	11
2.8	Distribuição percentual dos refrigeradores no Brasil em função da idade.....	13
2.9	Perfil da curva de carga estimada (residencial) e do Sistema de Manaus.....	18
2.10	Perfil da curva de carga estimada (residencial) e do Sistema de Vila Campinas	18
2.11	Perfil da curva de carga estimada do condado de Hombolt nos Estados Unidos.	18
2.12	Perfil da curva de carga estimada de Nova York nos Estados Unidos	19
2.13	Fotografias de casas de gelo em Boston, Estados Unidos (1827) e na fortaleza de Louisberg, Canadá (Século XIX).	21
2.14	Ilustração do Monitor-Top, primeiro refrigerador produzido em larga escala pela GE em 1927	22
2.15	Ilustração dos componentes de um refrigerador	24
2.16	Ciclo padrão de compressão a vapor	25
2.17	Modelos de Termostato para Refrigerador.....	29
2.18	Sistema de controle em malha aberta e Sistema de controle em malha fechada	32
2.19	Representação de um controlador automático genérico	33
2.20	Representação do controle da temperatura e sinal de referência.....	35
3.1	Exemplo de retratos térmicos de refrigeradores residenciais	37
3.2	Fluxograma para tomada de decisão do modo a ser executado	39
3.3	Fluxograma do Modo de Aprendizado	40
3.4	Fluxograma do Modo Normal.....	41

3.5	Modelo de Circuito para <i>Reed Switch</i> e foto real do componente	44
3.6	Sensor de Efeito Hall modelo S41 e Circuito para sua utilização	45
3.7	Modelo de Circuito para um RTC e foto de um RTC (PCF8583)	46
3.8	Modelo de Circuito utilizado e foto do componente utilizado (MAX232N)	48
3.9	Cabo conversor USB/Serial utilizado.....	49
3.10	Modelo de Circuito com transistor (canto superior direito) e relé.....	50
3.11	Microprocessador ATMEGA8	52
3.12	Modelo dos circuitos que serviram como base para a montagem do protótipo e testes iniciais	54
3.13	Protoboard com os componentes utilizados nos testes.....	55
4.1	Mensagem enviada pelo microprocessador no teste do RTC	58
4.2	Mensagem enviada pelo microprocessador no teste do Relé	59
4.3	Circuito preparado para a utilização de um botão e imagem deste componente	61
4.4	Primeira Fase do modo de Aprendizado	63
4.5	Segunda Fase do modo de Aprendizado.....	63
4.6	Terceira Fase do modo de Aprendizado.....	64
4.7	Modo de Aprendizado com RTC.....	65
4.8	Primeira Fase do modo Normal	66
4.9	Segunda Fase do modo Normal	66
4.10	Terceira Fase do modo Normal	67
4.11	Modo Normal com RTC	68
4.12	Modelo Completo do Algoritmo	69

LISTA DE TABELAS

2.1	Resultados da Simulação da eficiência energética de refrigerador de uma porta.	15
2.2	Custo de cada melhoria por refrigerador.	16
2.3	Comparação entre período para recuperar o investimento, total de energia poupada e total de economia na conta dos consumidores.	17
3.1	Relação dos componentes utilizados no modelo final.	53

1. INTRODUÇÃO

Devido à uma extensa gama de razões, chegamos a um ponto no curso da história humana em que grande parte da população se atenta aos efeitos do presente modo de vida sobre a capacidade do planeta de sustentar o mesmo e consequentemente sustentar a espécie humana.

Talvez do próprio instinto de perpetuar o legado de nossa civilização, há hoje a sensação de que devemos reduzir o consumo de recursos naturais e migrar para formas de produção, seja de energia ou bens de consumo e serviços, que diminuam o impacto sobre o planeta.

Parte da mudança de paradigma envolve avaliar o impacto de bens e equipamentos que tomamos como garantidos e necessários, e buscar soluções para minimizar a demanda de recursos para operar os mesmos.

Dentre os equipamentos que se incorporaram no modo de vida moderno estão os refrigeradores. Presentes na maioria esmagadora das residências e encontrando aplicações em vários setores da indústria e no setor de serviço, são certamente responsáveis por uma grande demanda de energia elétrica e vem sendo alvo há vários anos de inúmeros estudos para aumentar a eficiência de sua operação.

Neste trabalho, será analisado o caso brasileiro. Será verificado o impacto dos refrigeradores domésticos sobre o consumo nacional de energia, principalmente no tocante à demanda de ponta, que para ser suprida requer geralmente grandes investimentos por parte do estado, e consome uma grande quantidade de recursos, por serem geralmente usinas termoeletricas as soluções adotadas.

1.1 DIAGNÓSTICO

Fatos em um passado recente despertaram a atenção do poder público e também do cidadão brasileiro para uma considerável fragilidade no sistema de fornecimento de energia elétrica brasileira.

Longos períodos de estiagem associados à maus hábitos de consumo e equipamentos pouco eficientes no tocante ao consumo de energia trouxeram o país a uma situação de racionamento de energia, que contribuiu de maneira considerável na mudança de hábitos relacionados ao consumo de energia, principalmente no setor residencial.

Implemetaram-se soluções que visam a redução do consumo residencial, como a adoção de lâmpadas fluorescentes e de aquecimento solar para os chuveiros.

Os refrigeradores domésticos contabilizam hoje a maior parte da demanda de energia elétrica residencial que não apresenta um substituto que utilize fontes alternativas energia - como o chuveiro elétrico, que pode ser substituído por um de aquecimento solar .

Sendo assim, é natural que estes equipamentos sejam alvo dos programas de eficiência energética encontrados pelo Brasil, e a redução do consumo destes ocorre basicamente pelo avanço tecnológico dos produtos no mercado, acompanhados pelos selos de eficiência energética e pelos programas de substituição subsidiada de refrigeradores domésticos.

Tais subsídios tem origem em uma legislação considerada moderna, que obriga que concessionárias e distribuidoras de energia apliquem parte dos lucros em projetos de pesquisa e inovação, ou de substituição de equipamentos elétricos para a população, especialmente a de baixa renda.

Praticamente a totalidade destes recursos são utilizados nos programas que visam a troca de refrigeradores utilizados pela população de baixa renda, justificado pelo fato da diferença entre o consumo de um refrigerador fabricado há mais de 15 anos e um moderno pode chegar a 250% nos casos mais extremos.

Refrigeradores também são encontrados em basicamente todo o setor comercial, no poder público, escolas, hospitais entre outros, representando uma parcela ainda maior de consumo.

Geralmente representam 30% do consumo de uma residência– podendo chegar a ser maior de 50% no caso em que há aquecimento solar de água – justificando serem um dos maiores focos de efficientização no tocante à redução do consumo energético residencial no Brasil, que no ano de 2010 demandou 108.457 GWh, de acordo com o Balanço Energético Nacional.

Mesmo com os resultados dos programas de eficiência energética favorecendo tal, outro problema encontrado na manutenção do sistema elétrico nacional é o da demanda de ponta, ou seja, a demanda de energia elétrica máxima encontrada durante o dia.

Flutuações no consumo de energia durante o dia demandam que durante horários específicos, manobras no sistema elétrico nacional sejam realizadas para que se atenda o aumento do consumo. Equipamentos eficientes ajudam a reduzir esta diferença a ser suprida, mas medidas mais drásticas podem ser tomadas.

Deslocar a demanda de ponta para horários de menor consumo mostra-se como uma estratégia eficiente para diminuir a diferença de consumo entre os horários de maior demanda e de demanda normal.

Na sequência será apresentada a oportunidade encontrada diante desta situação colocada.

1.2 OPORTUNIDADE ENCONTRADA

É prática comum hoje no setor industrial brasileiro, incluir nos contratos de fornecimento de energia cláusulas que forneçam motivos para que a indústria adote soluções que a permitam não demandar energia elétrica no horário de ponta: seja pelo desligamento da fábrica programado ou pelo uso de equipamentos geradores de energia.

No setor residencial por outro lado encontram-se poucas possibilidades de se realizar esse deslocamento de demanda, já que os utensílios domésticos demandam energia no momento em que estão sendo utilizados e a adoção de geradores não é economicamente viável.

Algumas soluções são encontradas no mercado, como sistemas de aquecimento solar de água, que apresentam em seu reservatório uma resistência elétrica que permite que a água seja aquecida ao nível de temperatura desejado antes do horário previsto de utilização.

Face a esta dificuldade, vislumbrou-se assim a possibilidade de criação de um equipamento que tenha como objetivo dotar os refrigeradores comuns de uma inteligência no tocante ao controle do compressor, a fim de gerir a temperatura interna do refrigerador de modo que o compressor deste evite ser acionado durante o período de ponta.

Tal possibilidade é baseada no fato de o funcionamento do refrigerador ser intermitente, consistindo em uma fase de resfriamento, na qual há consumo de energia, seguida de uma fase em que o refrigerador opera desligado, somente evitando a entrada de calor no compartimento refrigerado.

Sendo tal equipamento instalável sem a necessidade de modificações no refrigerador, seu potencial de uso se estende por todo o setor residencial e público brasileiro, evitando grande parte da demanda de ponta residencial.

No caso do sucesso do equipamento, paralelamente outros benefícios são criados, como uma redução nos gastos públicos, devido a menor necessidade de construir e operar plantas de geração de energia para atender à demanda de ponta.

1.3 OBJETIVOS

Desenvolver e validar experimentalmente um equipamento que dê ao refrigerador doméstico a capacidade de, através do gerenciamento inteligente da operação do compressor, alterar o horário em que vá demandar energia elétrica a fim de reduzir a demanda de ponta no setor elétrico.

O aparelho deve ser capaz de:

- Controlar o compressor de forma a que este possa estar desligado durante todo ou grande parte dos horários de ponta;

Ao passo de que para isso deve:

- Operar em qualquer tipo de refrigerador não-eletrônico sem necessidade de modificação no equipamento, bastando apenas conectar o refrigerador ao equipamento e este a rede elétrica;
- Operar dentro dos horários de demanda de ponta e compensar pela vigência de horário de verão ou não no estado;

- Não afetar o correto acondicionamento do material refrigerado;
- Validar um produto base para ser adaptado para outros equipamentos e setores do consumo de energia elétrica (industrial, agrícola), dotando aparelhos de uma inteligência para gerir melhor o consumo de energia elétrica baseado no ciclo de operação usual;

O equipamento será desenvolvido utilizando plataformas de *hardware* e *softwares* abertas permitindo que o equipamento seja replicado em outros países a fim de auxiliar no desenvolvimento local pela redução na demanda por infra-estrutura de geração de energia.

1.4 ROTEIRO E METODOLOGIA

Neste trabalho serão desenvolvidas, com exceção desta parte introdutória, duas grandes seções necessárias para a compreensão dos conceitos envolvidos no desenvolvimento do projeto, do porquê de se desenvolver tal equipamento e como se realiza o desenvolvimento de tal.

Primeiramente será realizada uma revisão bibliográfica sobre temas correlatos com o trabalho, que será iniciada com um panorama do setor elétrico brasileiro, explicitando conceitos utilizados e também o panorama atual do setor.

Será avaliada a participação do setor residencial na demanda total e através de projeções qual o real impacto do consumo dos refrigeradores sobre esta demanda.

Com estes dados em mãos e informações a respeito da demanda de ponta no sistema pode-se verificar o real potencial do equipamento em amenizar esta demanda concentrada, a fim de permitir que a geração de base de energia supra a demanda dos refrigeradores momentos antes do início do horário de ponta.

Será apresentada uma introdução ao controle de sistemas, a fim de situar tanto o refrigerador doméstico quanto o equipamento proposto em modelos de controle conhecidos e para delinear a interação entre os dois equipamentos de forma conceitual.

Tendo realizado estas observações, serão em sequência abordados os temas relacionados ao funcionamento do refrigerador doméstico, seus componentes, como é realizado seu controle, quais os pontos passíveis de eficientização para redução do consumo de energia e como deve ser a interação do equipamento proposto para que o funcionamento do refrigerador não seja comprometido enquanto este atue.

A segunda grande seção do trabalho consiste no desenvolvimento do equipamento.

Serão introduzidos os conceitos de plataformas abertas de trabalho e o porquê de terem sido escolhidas.

Na sequência serão apresentados diagramas que representem o funcionamento do equipamento, tanto na parte de *hardware* quanto de *software*. Tais diagramas nortearão o desenvolvimento físico do equipamento, pois mostram as relações funcionais a serem criadas.

Posteriormente serão apresentados os desenvolvimentos de *hardware* e *software* do protótipo, incluindo um breve registro de versões.

Por fim será apresentada uma metodologia para se testar o equipamento e os resultados encontrados.

Ao final do trabalho, juntamente com a conclusão serão apresentadas possíveis rotas para aperfeiçoamento do equipamento com inclusão de novas funções que trarão diferentes benefícios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os refrigeradores domésticos são responsáveis por grande parte da energia elétrica consumida nos lares brasileiros. Entretanto, a estimativa de seu consumo para todo o setor residencial apresenta diversas dificuldades, especialmente na determinação da quantidade de equipamentos. Estima-se que o consumo de energia elétrica pelos refrigeradores residenciais no Brasil em 2005 foi da ordem de 23 TWh, cerca de 28% do consumo total de eletricidade no setor doméstico e 6% do consumo total de energia elétrica no país (Cardoso e Nogueira 2007). Em 2010, mantendo o percentual de 2005, o consumo energético de refrigeradores residenciais no Brasil, demandou 30.4 TWh, ou seja, um aumento em 32% no consumo de energia residencial, por parte apenas deste equipamento (Balanço Energético Nacional 2011).

O objetivo da análise de engenharia deste equipamento é avaliar não só alternativas de aumento de sua eficiência como também a possibilidade de redução da participação dos refrigeradores no consumo durante a demanda de pico da rede, deslocando o seu consumo. Uma elevada demanda de pico encarece os custos de produção de energia do nosso país pois utiliza fontes de energias não só mais caras como mais poluentes que a principal fonte de energia do nosso país, as hidrelétricas, que representaram em 2010 em 74% da produção de energia do país (Balanço Energético Nacional 2011).

Dentro dessa perspectiva, é importante que sejam analisadas não só as atuais formas de aumentar a eficiência de um refrigerador, baseadas em seu funcionamento, mas também as alternativas para deslocar o seu período de funcionamento. A principal forma de deslocar o período de funcionamento de um refrigerador é forçando o acionamento do seu compressor, equipamento que determina o consumo de energia elétrica deste equipamento.

Por não ter nenhum tipo de controle no seu acionamento, o compressor de um refrigerador pode ser acionado várias vezes durante a demanda de pico da rede e, por ser um equipamento de alta penetração nas residências do país, representar papel fundamental na demanda de pico residencial. O deslocamento do período de funcionamento do compressor pode ser uma alternativa interessante para aliviar a demanda da rede nos horários de pico e pode representar uma economia de impacto nacional.

Neste capítulo são introduzidas as primeiras noções sobre o panorama do consumo de energia elétrica no país, refrigeradores residenciais e controle de sistemas. Inicialmente é apresentada uma breve revisão bibliográfica de alguns trabalhos que estudam o consumo de energia no país, a divisão da demanda e suas medidas de controle. Em seguida uma revisão sobre refrigeradores, sua efficientização e controle do seu funcionamento. Ao final da revisão bibliográfica, o tema controle de malha aberta e fechada será abordado.

2.1 PANORAMA DA OFERTA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Anualmente a EPE (Empresa de Pesquisa Energética), entidade vinculada ao Ministério de Minas e Energia, lança um documento chamado Balanço Energético Nacional. Este documento divulga, através de extensa pesquisa, toda a contabilidade relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil, contemplando atividades e operações ligadas à exploração e produção de recursos energéticos primários, à conversão em formas secundárias, às contas de importação e exportação, à distribuição e ao uso final da energia. Por ser um documento oficial e o mais atual, o mesmo será a base dos nossos dados.

A geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu, em 2010, 509,2 TWh. Este resultado é 10,0% superior ao de 2009. A principal contribuição permanece oriunda de centrais de serviço público, com 87,5% da geração total. A principal fonte de energia elétrica nacional é a energia hidráulica, que apresentou elevação de 3,7% em 2010 e atingiu o valor de 74% do total.

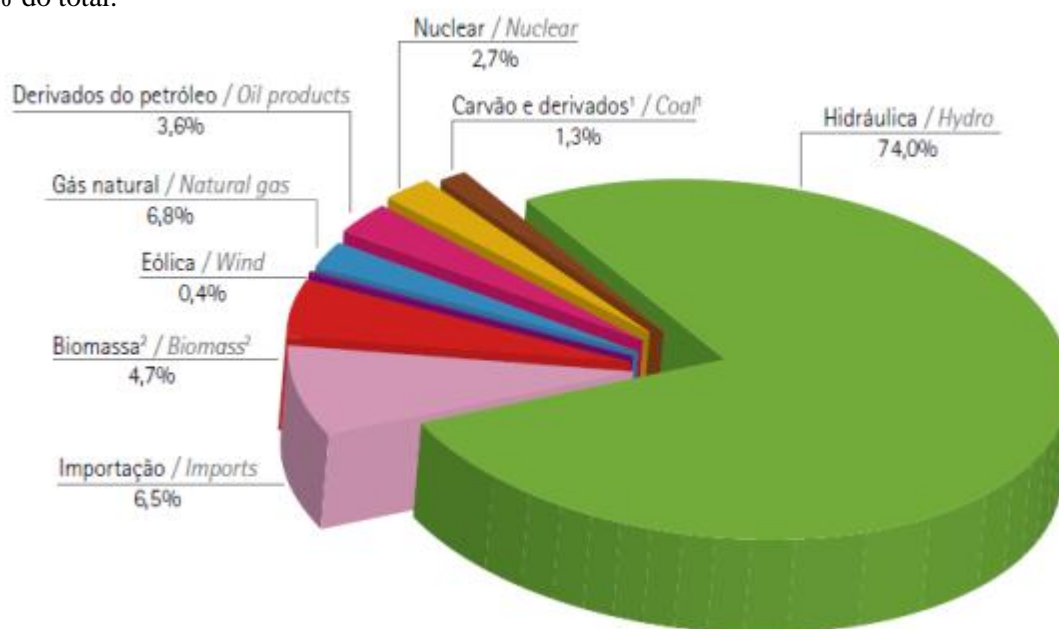


Figura 2.1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte - 2010

Este panorama de oferta de energia mudou consideravelmente após a crise de energia no nosso país entre 2001 e 2002. Nessa época o Brasil passou por uma crise no setor elétrico que foi denominada popularmente de “Apagão”. Inicialmente a ausência de chuvas foi apontada como causa do racionamento, afinal de contas o parque gerador brasileiro era composto em 90% de usinas hidroelétricas. Posteriormente, foi detectado que o “Apagão” foi causado também por falta de investimentos no sistema elétrico interligado nacional. Na época, a necessidade de redução no consumo de energia elétrica era de até 20% na maioria dos Estados brasileiros, embora alguns poucos

Estados continuaram com seu consumo normal, pois algumas hidrelétricas continuaram com seus limites máximos de armazenamento de água e até sendo obrigadas a verter água. Estes acontecimentos contribuíram para que o País sofresse retração econômica, paralisando investimentos internos e externos e causando falências em empresas, desemprego e privação parcial da utilização do bem público “Eletricidade” à maior parcela da população brasileira (SILVA Jr., 2005).

A seguir segue um gráfico que mostra a evolução tanto da produção quanto da capacidade instalada de energia elétrica no nosso país desde 2002 até o último balanço energético nacional.

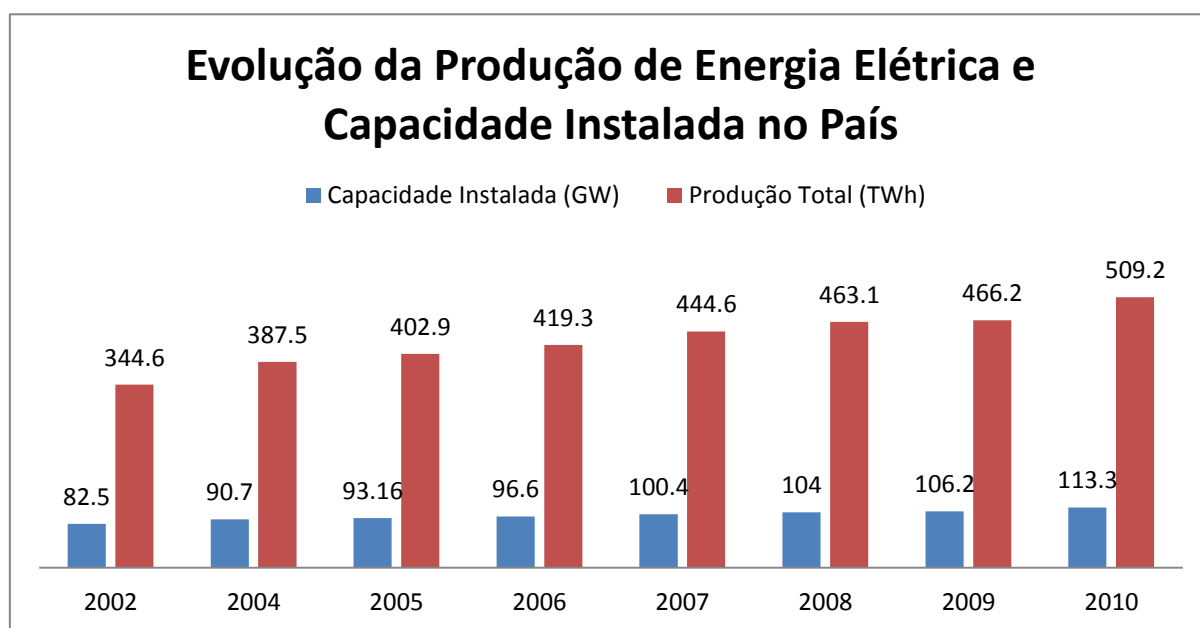


Figura 2.2 - Evolução da Produção de Energia Elétrica e Capacidade Instalada no País (Os dados foram todos retirados dos balanços energéticos nacionais dos anos base citados acima)

Além das hidrelétricas, as Termelétricas são atualmente de fundamental importância para o nosso país participando em 2010 em 16,4% do total da produção de energia elétrica no nosso país.

As termelétricas começaram a ter um papel maior na malha energética do país justamente entre 2001 e 2002, como já citado acima, quando usinas termelétricas emergenciais foram contratadas para evitar o agravamento do quadro. Os maiores níveis de produção de energia termelétrica ocorreram no início de 2008 e entre agosto e dezembro de 2010. No primeiro caso o ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, autorizou o despacho termelétrico, ou seja, todas as termelétricas disponíveis foram convidadas a produzir e distribuir energia elétrica, fato totalmente inusitado no início do ano, por causa do atraso da chegada do período úmido, que estava deplecionando os reservatórios do Sudeste a uma taxa preocupante. O segundo caso é talvez mais complicado. Devido os desligamentos ocorridos nas linhas de Itaipu em novembro de 2009, esta usina passou a operar com produção reduzida entre dezembro de 2009 e junho de 2010. (Alvaro Augusto, 2011). Atualmente as termelétricas continuam sendo fundamentais para os momentos em que as hidrelétricas estiverem em situação emergencial.

Finalizada uma breve revisão sobre a geração de energia no país, segue uma breve revisão sobre o panorama do consumo elétrico.

2.1.1 Divisão da demanda de energia elétrica

O consumo de energia no país tem como principais setores o Residencial, Comercial, Industrial e demais setores (agricultura, público, transportes e energético). Nos últimos anos, o crescimento do consumo de energia elétrica tem sido alavancado graças ao crescimento econômico e populacional. Os dados abaixo também foram retirados do boletim energético nacional e mostram a evolução deste consumo.

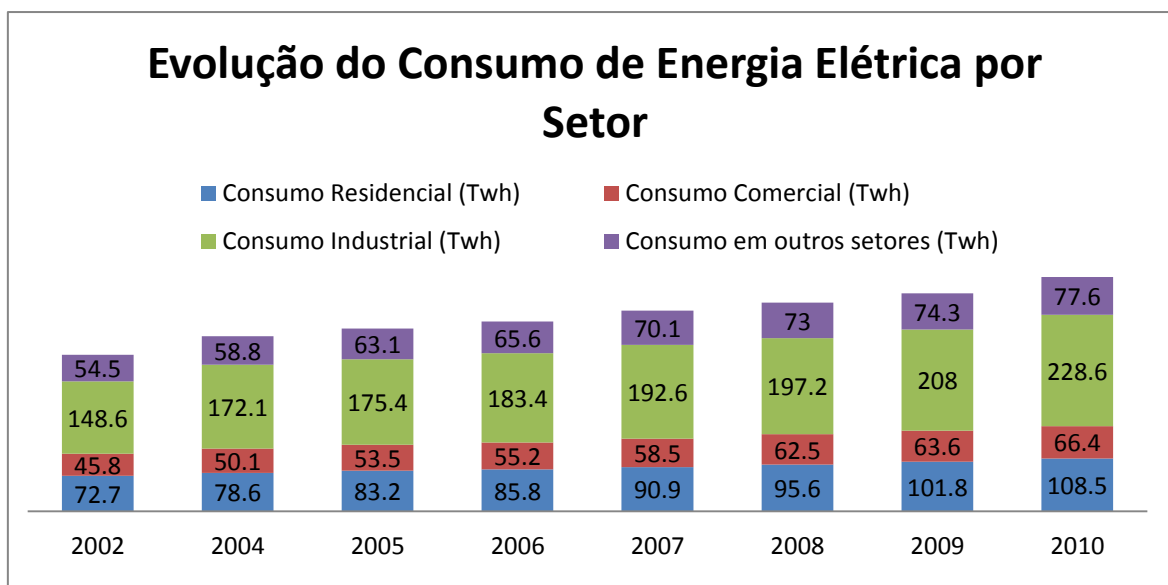


Figura 2.3 - Evolução do Consumo de Energia Elétrica por Setor

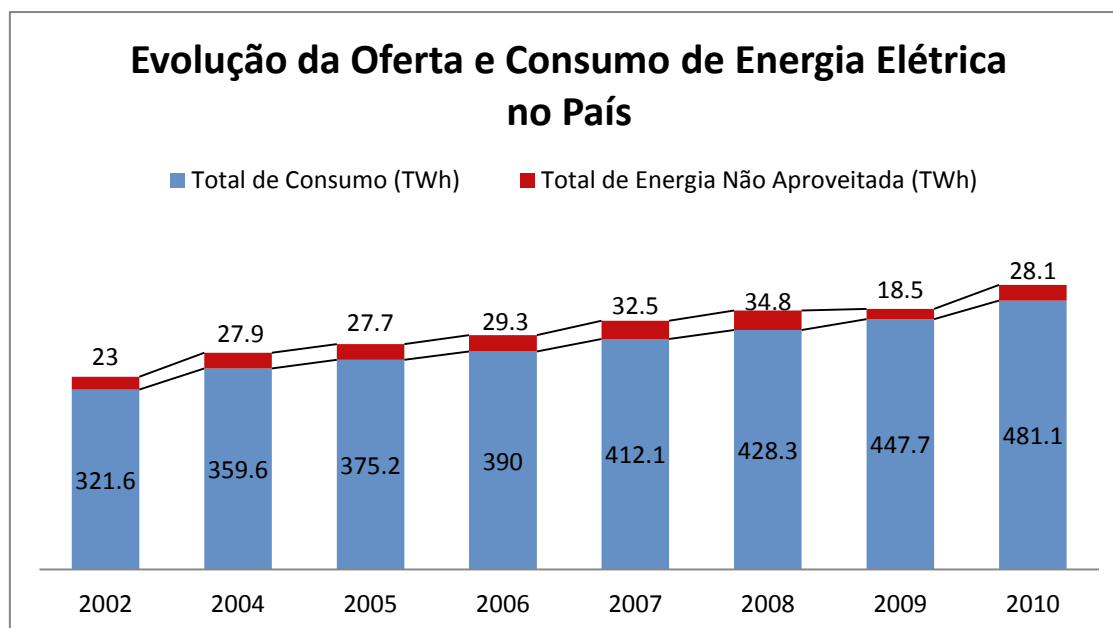


Figura 2.4 - Evolução da Oferta e Consumo de Energia Elétrica no País

Fazendo uma análise dos dados acima, o consumo residencial representa em média 23% do consumo nacional. Mais detalhadamente, o consumo residencial também tem o seu perfil de consumo.

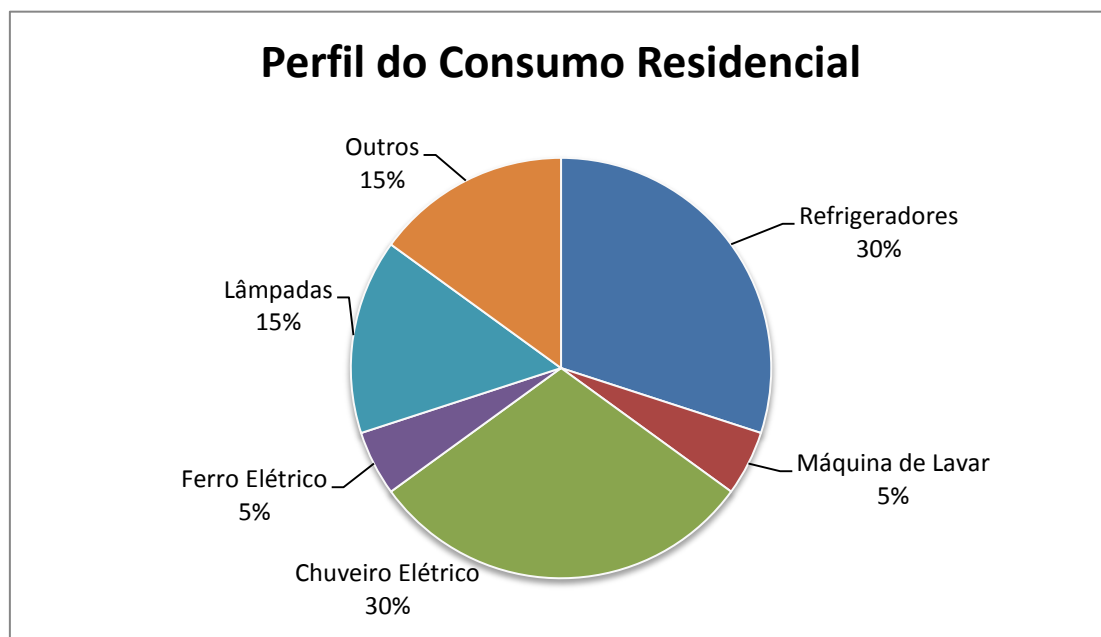


Figura 2.5 – Perfil do Consumo Residencial (Jannuzzi 2007).

Como citado anteriormente neste relatório, o consumo dos refrigeradores representa uma fatia importante no consumo energético nacional e portanto justifica-se o seu estudo. Mais abaixo é apresentado um modelo para determinação do parque de refrigeradores e também do consumo e percentual da participação dos refrigeradores no cenário nacional.

2.1.2 Modelos para previsão do parque de refrigeradores nacional

No nosso país os refrigeradores estão presentes em 96% das residências segundo as pesquisa mais recentes sobre o assunto (Pesquisa ELETROBRÁS/PROCEL 2006).

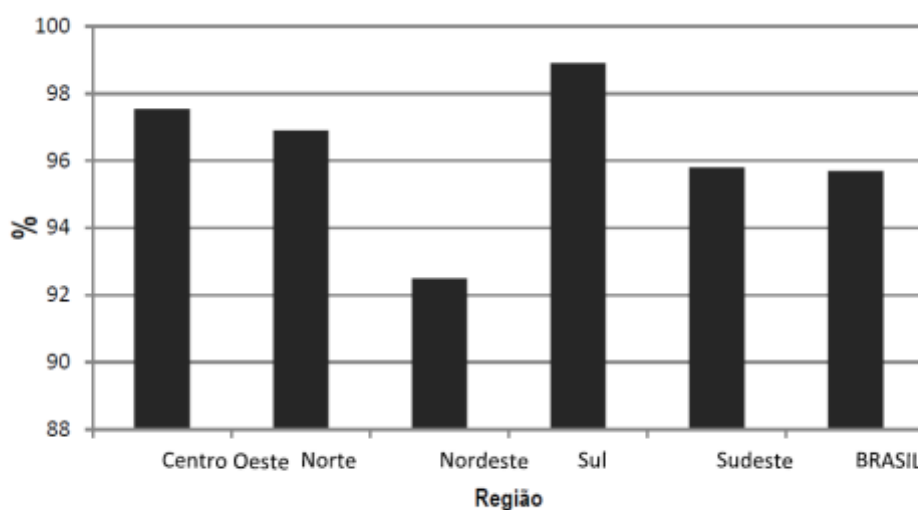


Figura 2.6 – Percentual de refrigeradores em residências por região (Cordeiro 2006, Pesquisa Eletrobrás/Procel).

A idade dos refrigeradores é fator fundamental na análise desse projeto. Quanto maior a idade dos refrigeradores, menor é a sua eficiência e, portanto, maior é o potencial de economia energética que o país pode alcançar.

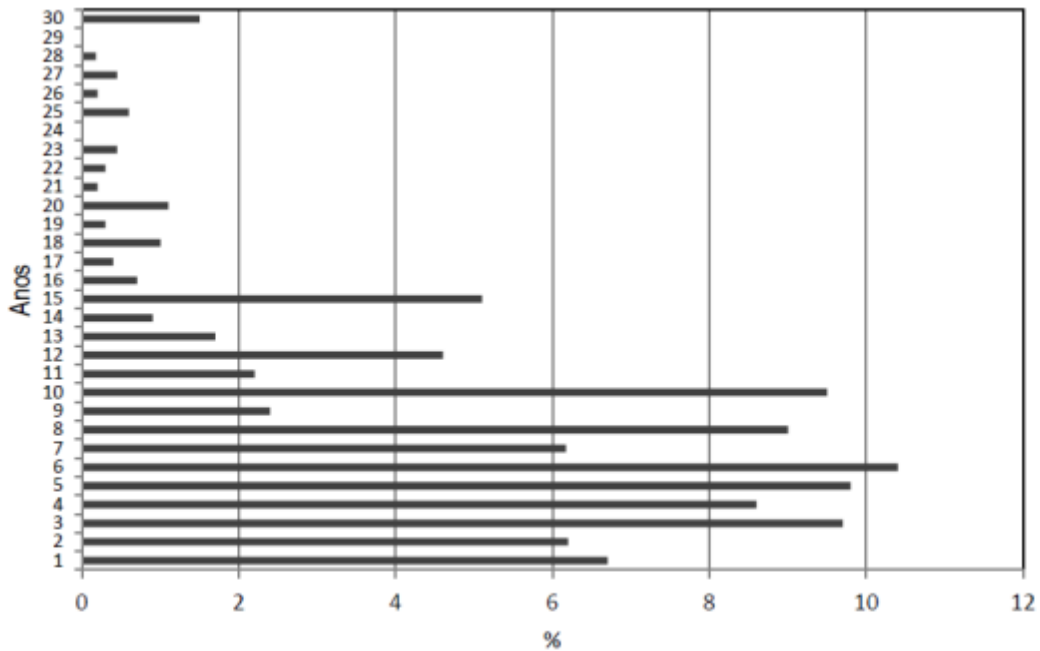


Figura 2.7 – Distribuição percentual dos refrigeradores no Brasil em função da idade (Cordeiro 2006, Pesquisa Eletrobrás/Procel).

Porém o número de refrigeradores é um dado um tanto quanto difícil de se mensurar. Alguns modelos foram criados para obter-se uma estimativa do parque de refrigeradores. Dois dos principais modelos para estimar estes dados serão abordados a seguir.

O primeiro é o modelo baseado na venda e descarte de refrigeradores. A formação do parque de refrigeradores baseada em dados de venda e sucateamento, toma em conta as entradas (vendas anuais) e as saídas (em torno dos 16 anos de uso desenvolveu-se segundo a seguinte modelagem) desses equipamentos do mercado. (Queiroz, et.al., 2007).

$$N_i = \left(\sum_{i=N-16}^N V_i \right) - N_N \quad (2.1)$$

$$N_N = \mu V_{i15} + \alpha V_{i16} + \beta V_{i17}$$

N_i - Parque de refrigeradores no ano i ;

V_i – Vendas de refrigeradores no ano de fabricação i ;

N_N – Sucateamento de refrigeradores no ano N ;

V_{i15} , V_{i16} e V_{i17} – Refere-se às vendas de refrigeradores, há 15, 16 e 17 anos respectivamente;

α , β , γ – Coeficientes de sucateamento, respectivamente 0,5; 0,4 e 0,1; valores determinados considerando o parque de refrigeradores informado pelo PNAD/IBGE (diversos anos).

O segundo modelo é o de penetração de refrigeradores no setor residencial. Em que a formação do parque de refrigeradores do setor residencial brasileiro é baseado na penetração de equipamentos. Com base nos estudos de McNiel e Letschert (2005), que considera o número de domicílios e a respectiva posse de equipamentos, apresenta a seguinte modelagem:

$$N_i = N_{di} \cdot S_i \quad (2.2)$$

N_i - Parque de refrigeradores no ano i ;

N_{di} – Número de domicílios particulares do Brasil no ano i ;

S_i – Posse de equipamentos por residência brasileira no ano i .

$$S = S_{max} \cdot (1 - \exp(a \cdot I^a \cdot L))^{b \cdot (RE)^\delta} \quad (2.3)$$

$$RE = 1 - \frac{1 - E}{1 - U}$$

S – Posse de refrigeradores do setor residencial

S_{max} – Posse máxima com interferência climática (não utilizada = 1)

I – Renda média familiar

RE – Taxa de eletrificação rural nacional

E – Taxa de eletrificação nacional

U – Taxa de urbanização nacional

a , b , δ - Coeficientes da regressão, propostos pelos autores

Aplicando as modelagens anteriores foi possível obter a evolução do parque de refrigeradores ao longo dos últimos anos. Esses dados são apresentados na Figura 2.8.

Os resultados dos dois modelos apresentados neste relatório apresentaram diferenças consideráveis. Tomando como exemplo as estimativas para 2005, o modelo de venda e descarte apontou aproximadamente 48 milhões de equipamentos, enquanto que o modelo de penetração de equipamentos indicou 42 milhões.

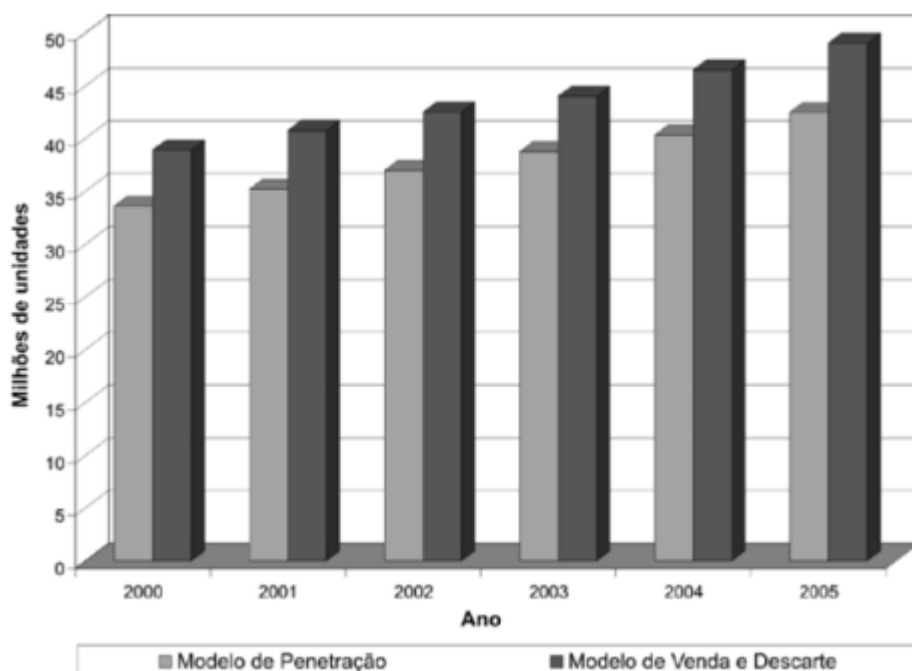


Figura 2.8 – Parque de Refrigeradores do Brasil nos últimos anos (Cardoso e Nogueira 2007).

É importante a análise destes dados para perceber o potencial que este projeto pode alcançar. Os dados de 2005 indicam um número de quase 50 milhões de geladeiras no nosso país. É bastante razoável pensar que em 2012 devido não só o crescimento populacional quanto do desenvolvimento do país e das tecnologias, aumento do salário mínimo e desenvolvimento natural das tecnologias, o número de refrigeradores tenham crescido também consideravelmente. Apesar desse estudo do Cardoso e Nogueira não ter continuado até os dias atuais, estimar em 55 milhões de refrigeradores em 2012 não seria tão distante do valor real.

O projeto analisou alguns refrigeradores residências e percebeu que a potência média dos compressores é de 150W. A importância do consumo dos refrigeradores no nosso país pode chegar a 8.25 GW. Este valor corresponde a 7.3% da capacidade energética instalada do país. Portanto, pensar em deslocar todo esse consumo para um horário mais econômico para a rede pode acarretar em resultados importantes em termos de economia de recursos nacionais.

Devido não só ao número elevado de residências com refrigeradores antigos com mais de 10 anos de uso, mais de 30%, mas também de outros equipamentos de baixa eficiência, como lâmpadas incandescentes, há uma preocupação no sentido de aumentar a eficiência de alguns produtos residenciais e , por consequência, aliviar a rede elétrica nacional. Um tópico importante a ser abordado é sobre o histórico do país a cerca desse assunto.

2.1.3 O Brasil e a Eficiência Energética

Atualmente no Brasil existem instrumentos modernos de incentivo à inovação tecnológica introduzindo com maior rapidez os produtos energeticamente mais eficientes no mercado consumidor

(Lei de Eficiência Energética, investimentos obrigatórios em eficiência energética por parte das concessionárias de energia elétrica, Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, etc.).

Os programas de eficiência energética são ferramentas que auxiliam na redução de consumo garantindo conforto à população e crescimento econômico ao País (qualidade dos equipamentos, maiores investimentos privados, etc.). O Brasil já possui a Lei 10.295 (BRASIL, 2001a), regulamentada pelo Decreto 4.059 (BRASIL, 2001b) que dispõe sobre a “Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia” estabelecendo grupos de ações para estudar e estabelecer padrões mínimos de eficiência energética para equipamentos consumidores de energia elétrica que são comercializados no País.

A implementação de programas de eficiência energética para consumidores de baixa renda no Brasil é um fato antigo. Esses programas tem sido praticados já há algum tempo com diferentes objetivos, especialmente através de programas para substituir lâmpadas incandescentes por fluorescentes. A implementação desses programas começou no início dos anos 90 pela CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) e pela CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), e em seguida por outras companhias através do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) (Jannuzzi, Dornelas et al. 1997).

Desde 2005, é obrigatório que 50% dos investimentos em eficiência energética sejam para as residências de famílias de baixa renda. Atualmente R\$190 milhões são destinados a programas de eficiência para residências com famílias de baixa renda. A maioria desses investimentos são para substituição de lâmpadas e refrigeradores, troca da instalação elétrica e aquecimento solar.

O programa mais importante atualmente é realizado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), cujo nome se chama Programa de Eficiência Energética (PEE). O objetivo desses programas é demonstrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia elétrica e de melhoria da eficiência energética de equipamentos. Para atingir este objetivo, busca-se maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada no âmbito desses programas. Busca-se, enfim, a transformação do mercado de energia elétrica, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos racionais de uso da energia elétrica. Para participar desse programa, a própria ANEEL disponibiliza um manual com as diretrizes para que as empresas possam elaborar projetos de eficiência energética.

Em 2010, 914 projetos fizeram parte do PEE 2010 num custo total de R\$2,415 bilhões. Sendo pelo menos 50% desses projetos para residências de baixa renda e a maioria desses para substituição de refrigeradores e lâmpadas. Segundo dados do programa, esses projetos economizarão 2,065 TWh por ano e 705,9 MW retirados do período de ponta.

Dentre esses estudos e programas revisados para a realização deste trabalho, destaca-se o do Gilberto de Martino Jannuzzi, e outros colaboradores, em 2007. A proposta do autor é avaliar o potencial de um programa de substituição de refrigeradores para populações de baixa renda em troca do subsídio que eles atualmente recebem para sua conta de eletricidade. O projeto começa com a motivação de que existe um elevado percentual de refrigeradores em residências e que a participação do mesmo na conta de energia é fundamental (entre 30% e 70%, para residências sem chuveiro elétrico, muitas delas encontradas no estado da Bahia).

O subsídio, dinheiro não arrecadado pelo governo, em questão representa no total R\$1,4 bilhão por ano, número que pode ser maior se considerarmos as residências que não pagam a conta ou que não tem contadores. A ideia é atrair esses consumidores, trocando sua geladeira, e retirando o benefício.

A ideia só se torna válida se os novos refrigeradores tiverem um aumento significativo na sua eficiência energética. Para listar as melhorias de eficiência através de mudanças técnicas no aparelho, os autores construíram uma tabela com as melhorias propostas que são, em suma, melhorar o desempenho do compressor e aumentar o isolamento do refrigerador. Segue a tabela com as melhorias e os percentuais de eficiência.

Tabela 2.1 – Resultados da simulação (Vendrusculo et al. 2003): eficiência energética de refrigerador de uma porta.

Melhorias Técnicas	Percentual de aumento de eficiência energética	
	Refrigerador	Peso da melhoria de eficiência no cenário global(%)
	Antes(%)	Depois(%)

Compressor	C1 – Aumento em 20% da eficiência do compressor				
		12.1	20.7		16.1
	Aumento na espessura de isolamento	C2 – Na porta – ½ polegada	3.8	3.9	3.9
		C3 – Na parede – ½ polegada	10.2	14.1	12.0
		C4 – Na porta – 1 polegada	2.9	2.9	2.9
		C5 – Na parede – 1 polegada	8.4	10.0	9.2

Tabela 2.2 - Custo de cada melhoria por refrigerador

Opção de design	Custo Esperado (R\$)
C1	60
C2	20
C3	67
C4	18
C5	160.6

Após uma série de hipóteses de ciclo de vida, tempo médio para recuperação do investimento, e de acordo com as melhorias propostas nas tabelas anteriores, os autores chegaram ao resultado de que seria possível economizar até 46 TWh de energia, cerca de 9% da produção de energia em 2010, e R\$ 8.49 bilhões na conta de eletricidade dos consumidores no período de 16 anos, o que representa cerca de R\$ 530 milhões por ano economizados.

Tabela 2.3 - Comparação entre período para recuperar o investimento, total de energia poupada e total de economia na conta dos consumidores

Aumento de eficiência energética do refrigerador (comparado com as configurações de refrigeradores de 2000)	24% (padrão entre 2005 e 2020; opções de design C1+C2 da tabela 2.1)	48% (padrão entre 2010 e 2020; opções de design C3+C4+C5 da tabela 2.1)
Tempo de recuperação de investimento	7 anos	12 anos
Economia de Energia	46.18 TWh	66.68 TWh
Economia na conta de luz do consumidor	R\$ 8.49 Bilhões	R\$ 8.48 Bilhões

Esta revisão sobre o assunto é importante pois indica que o país vem investindo em projetos que tenham a intenção de diminuir o consumo nacional ou desviar esse consumo do período de ponta. Isto é importante para o projeto em questão pois motiva saber que existe uma preocupação real com o assunto e a possibilidade de investimentos por parte do governo.

Seguindo a revisão bibliográfica, o próximo objeto de estudo são as possibilidades no alívio da demanda de ponta nacional.

2.1.4 A demanda de ponta

O conceito de demanda de ponta é bastante simples. Uma região, uma cidade, um país, apresenta um perfil de consumo que varia ao longo do dia. A demanda de ponta é justamente o período em que a rede apresenta maior demanda. Segundo site do governo federal, o horário de pico do país é entre 18h e 21h, horário em que a maioria das pessoas está em casa, logo, fazendo uso de equipamentos eletrônicos. Além disso a demanda varia bastante de acordo com o clima. No Brasil, a demanda é maior no verão devido ao aumento no uso de ar condicionados. Já na Europa e países mais frios, o inverno é a estação de maior consumo devido ao uso de aquecedores.

Por curiosidade, na França o período de ponta é tradicionalmente às 19 horas. A justificativa é devido não só ao número de pessoas em suas residências como também as condições climáticas serem mais frias na totalidade do território. Um dado interessante sobre como o clima influencia de maneira diferente em cada país é a diminuição de um grau de temperatura traduzida em um aumento estimado de consumo elétrico. Para cada grau são consumidos 2.300 MW na França, 600MW na Inglaterra, 500 MW na Alemanha e 300 MW na Itália.

O estudo da demanda de pico é importante, pois a rede tem que ser dimensionada para suportar este consumo máximo, valor que é em sua maioria consideravelmente superior ao consumo médio de uma região. No nosso país em 19 de Abril de 2012 o consumo médio mensal de energia elétrica do

Sistema Interligado Nacional (SIN) foi de 62,46 gigawatts (GW). Já o pico de energia, de acordo boletim do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) da mesma data, registrou uma carga gerada de 76,7 GW (gigawatts). Vale lembrar que a capacidade nacional instalada em 2012 é de 113,3 GW. E que para esses valores a demanda de pico é cerca de 23% maior que a média da demanda.

A curva de demanda energética das cidades e países é um dado interessante para compreender o dinamismo de uma cidade ou de um país. Segue alguns exemplos.

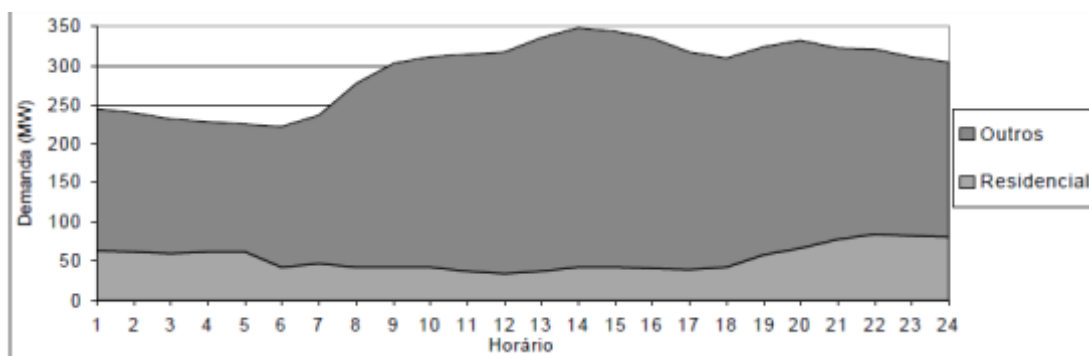


Figura 2.9 – Perfil da curva de carga estimada (residencial) e do Sistema de Manaus (Janeiro 1997)

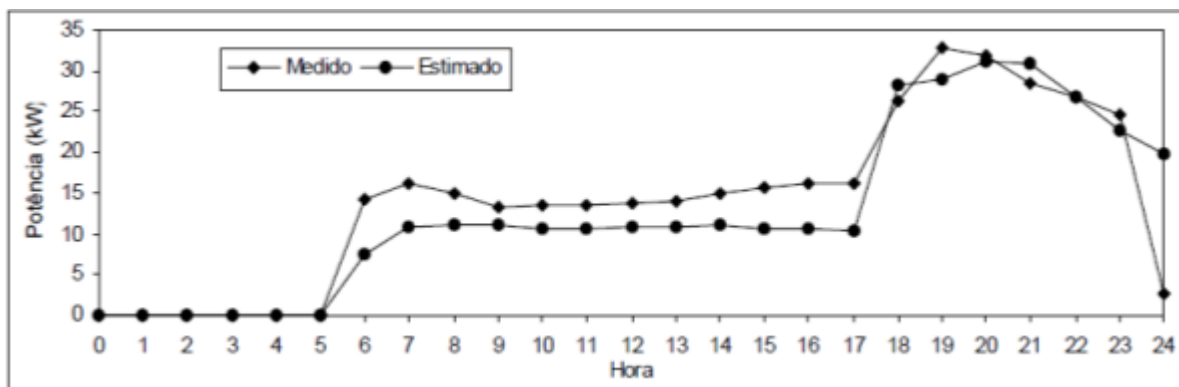


Figura 2.10 – Perfil da curva de carga estimada (residencial) e do Sistema de Vila Campinas (Janeiro 1997)

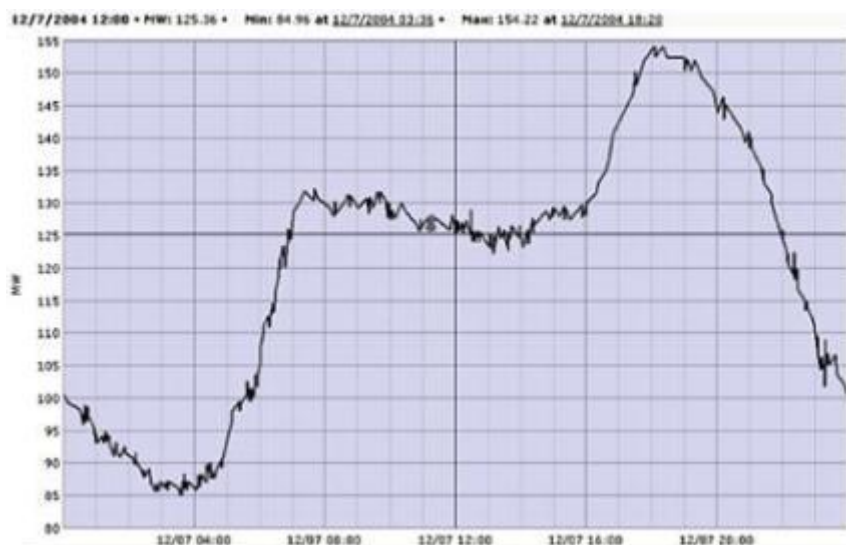


Figura 2.11 – Perfil da curva de carga estimada do condado de Hombolt nos Estados Unidos.

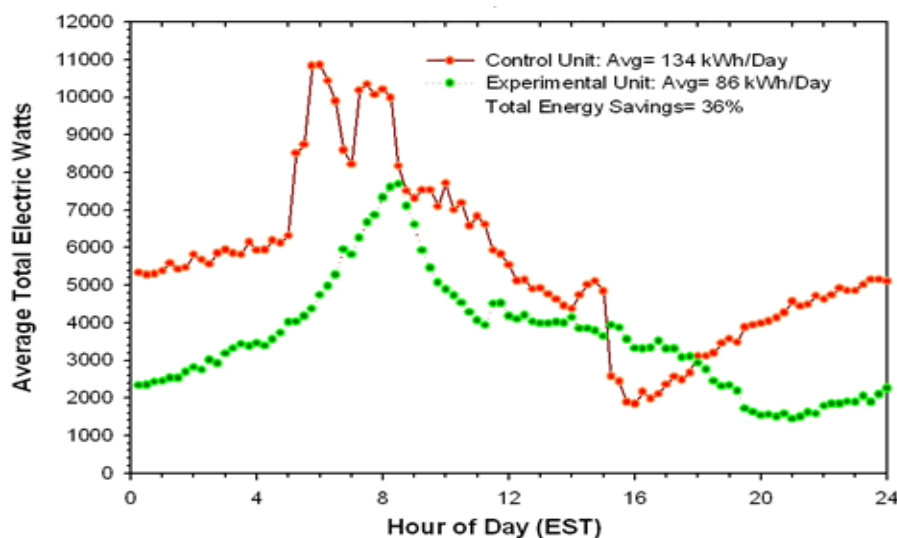


Figura 2.12 – Perfil da curva de carga estimada de Nova York nos Estados Unidos, entre novembro de 2002 e junho de 2003.

Essas figuras ilustram que dependendo da região, o horário de pico pode variar. No entanto, fica claro que é de extrema importância o controle da demanda de ponta de uma rede devido a enorme diferença entre o consumo médio e de pico de uma região. Aliviar o consumo no período de pico pode resultar em economias em investimentos bastante consideráveis para um país e, portanto, medidas para o controle da demanda de ponta devem ser feitas. Segue uma breve revisão sobre o assunto.

2.1.5 Medidas atuais para controle da demanda de ponta

Um rede de energia é composta basicamente por plantas de base, intermediária e de pico. No Brasil, a planta de base é composta praticamente pelas hidrelétricas. Já a sua planta de pico é composta basicamente pelas termelétricas.

Uma planta de pico pode operar tanto durante várias horas do dia quanto por apenas um período menor do que algumas horas. Isto vai depender da deficiência da rede no local.

Devido o elevado custo de se fazer uma planta eficiente, se uma planta de pico for funcionar durante um curto período do ano ou durante vários intervalos, é inviável fazê-la com uma eficiência comparável à de uma planta de base. Além do mais, os equipamentos utilizados em uma planta de base não poderiam ser utilizados em uma planta de pico pois condições flutuantes de funcionamento iriam causar esforços severos nos equipamentos. A alternativa mais comum é uma planta de pico que utilize combustível fóssil, seja gás natural, óleo combustível, etc. Em geral, as termelétricas, típica planta de pico, tem uma eficiência entre 20% e 42%.

O oposto de uma planta de pico é justamente a de base. Esse tipo de planta opera continuamente, tendo paradas apenas para manutenção e interrupções não programadas. Plantas de base e intermediárias são usadas preferencialmente para igualar a demanda energética devido a sua maior eficiência e serem

socorridas em caso de falhas, elevado período de seca, ou aumento não programado no consumo de energia.

Em alguns países do mundo, já existe uma preocupação em controlar a demanda energética dos consumidores residenciais. Existem alguns programas na Austrália, Canadá, Estados Unidos, Itália, entre outros, já bastante avançados. Em suma os planos tem como objetivo deslocar o uso de alguns equipamentos para fora do horário de pico.

O programa Australiano tinha como objetivo deslocar o período de funcionamento de Ar Condicionados, Bombas de Água das piscinas, e sistemas de água quente. O plano também incluía o aumento da eficiência de alguns itens, incentivo para se utilizar óleo combustível à eletricidade, e incentivos financeiros aos consumidores que utilizassem energia durante horários fora do pico de energia, quando é mais barato para companhias energéticas produzirem energia. Este programa atingiu uma redução no pico de eletricidade em 1,1GW e uma economia de \$4 bilhões em infraestrutura.

Em 2007, a empresa Toronto Hydro, distribuidora de energia na cidade de Ontario, tinha mais de 40 mil pessoas com um equipamento acoplado aos ar condicionados. As companhias de eletricidade podiam utilizar este equipamento para compensar os picos de demanda. Estima-se que esse programa reduzia em até 40 MW, apenas nessa cidade, em situações de emergência. Como comparação, a hidrelétrica de Corumba III tem 93MW de potência instalada.

Em Oklahoma, Estados Unidos, a companhia elétrica da região criou um programa de precificação variável de consumo elétrico. O programa incluía 2.500 residências e era bastante simples. Um site informava aos consumidores os melhores horários para eles ligarem seus equipamentos e quanto isto representaria em economia na sua conta de luz. Vários conselhos eram dados aos consumidores sobre qual hora seria melhor ligar sua máquina de lavar louças, máquina de lavar roupas, secadores, etc. Esse programa conseguiu reduzir em 33% a demanda de pico da cidade.

A Itália é o país que possui o maior sistema de *Smart Grid*, um monitoramento do consumo inteligente da rede. A empresa de energia da Itália, Enel SpA, instalou em mais de 30 milhões de consumidores um aparelho capaz de gerenciar o funcionamento dos equipamentos da residência inteira. Por os aparelhos estarem interligados à uma outra rede, o sistema decide quais residências ligarão quais equipamentos em um determinado horário. Isso possibilita um aproveitamento total da rede e evita uma geração de energia desnecessária. O aparelho pode até ligar ou desligar a energia de um consumidor se isto for melhor para a rede. Este programa também tem uma tarifa diferenciada de acordo com o horário do dia.

O Brasil atualmente não tem um programa deste tipo. Porém já em 2011 a ANEEL aprovou uma lei que define uma tarifa variável, opcional, que entrará em vigor já em 2014. A proposta é que as concessionárias poderão escolher 3 horas entre às 17 e 22 horas e definir qual o horário de pico da

região. Durante este horário, a tarifa será 5 vezes mais cara que a normal. No período intermediário, uma hora antes e uma hora depois do horário de pico, a tarifa será 3 vezes mais cara que a normal. E o período fora de pico, terá uma tarifa um pouco menor que a praticada atualmente.

A tarifa variável da energia em função do horário é fator fundamental para um programa que queira a conscientização dos consumidores e os faça mudar seus hábitos. A notícia de que a ANEEL já aprovou esta lei que entrará em vigor no ano de 2014 mostra que o país está preocupado com esta questão e está tomando medidas nesse caminho.

Neste sentido, serão apresentadas informações relevantes sobre o funcionamento dos refrigeradores domésticos com o intuito de entender o potencial existente no deslocamento da demanda energética deste equipamento.

2.2 REFRIGERADORES DOMÉSTICOS

Para se ter uma noção da importância do tema refrigeração, princípio básico de um refrigerador, os refrigeradores são considerados como a décima maior realização tecnológica do século XX pela *National Academy of Engineering*. Já a *American Society of Mechanical Engineering* considera a refrigeração entre as 10 maiores realizações do século XX.

Atualmente é impensável na nossa sociedade viver sem o uso de refrigeradores. Antes da aparição dos refrigeradores mecânicos, vivia-se na chamada “Era do Gelo”, em que dependíamos do armazenamento de gelo natural, e o mesmo era importado de regiões frias durante todo o ano. Inclusive muitas residências mantinham do lado de fora de suas residências um reservatório para esse gelo, chamados de casa de gelo.



Figura 2.13 – Fotografias de casas de gelo em Boston, Estados Unidos (1827) e na fortaleza de Louisberg, Canadá (Século XIX).

A primeira aparição de um refrigerador mecânico, de uma refrigeração artificial, foi demonstrada por Willian Cullen, da universidade de Glasgow em 1748. Em sua demonstração, o pesquisador escocês, utilizou uma bomba de vácuo para diminuir a pressão do éter e congelar água.

A primeira patente de um refrigerador foi feita por Jacob Perkins, um inventor norte americano, em 1834, com uma refrigeração por compressão de vapor. O primeiro refrigerador com uso em larga escala foi construído pela General Eletric em 1927 e foi chamado de “*Monitor-Top*”. Cerca de um milhão de unidades foram produzidas deste modelo. O seu compressor ficava em cima do equipamento e era envolvido por um anel para dar um aspecto mais agradável. Como refrigerante, estes aparelhos utilizavam ou Dióxido de Enxofre, corrosivo aos olhos podendo causar perda de visão, queimaduras na pele e lesões, ou Metanoato de Metila, altamente inflamável, danoso aos olhos e toxico se inalado ou ingerido. Curiosamente, algumas unidades ainda funcionam nos dias atuais.



Figura 2.14 – Ilustração do *Monitor-Top*, primeiro refrigerador produzido em larga escala pela GE em 1927.

Ao longo do desenvolvimento dos equipamentos de refrigeração o componente que teve maiores mudanças foi o refrigerante utilizado. Como visto no parágrafo anterior, os primeiros refrigeradores apresentavam gases altamente prejudiciais à saúde. No início do estudo dos refrigerantes, os refrigerantes naturais eram ou pouco eficientes ou causavam danos à saúde, como por exemplo a amônia. A tendência então era procurar um refrigerante eficiente e não prejudicial a saúde.

Em 1926, foi desenvolvido o primeiro refrigerante sintético pelo engenheiro norte americano Thomas Midgely Jr, o CFC12 (Clorofluorcarbono, R12), também chamado de Freon. Os CFCs eram uma alternativa não inflamável, não tóxica e eficiente termicamente. Ao longo dos anos, várias variações do CFC foram criados e em 1963 os mesmos já faziam parte de 98% da produção industrial de refrigerantes sintéticos.

Entretanto, após praticamente 50 anos de uso, os químicos norte americano e mexicano, F. Sherwood e Mario Molina, descobriram que os CFCs causam um sério problema ambiental, a depleção da camada de ozônio.

A partir do Protocolo de Montreal em 1987, cujo principal objetivo é controlar a destruição da camada de ozônio, os CFCs e HCFCs foram proibidos de serem produzidos e, como meta do protocolo, teriam sua eliminação total em 2010, medida aprovada na revisão do tratado em 1999 na cidade de Beijing. No Brasil, um Plano Nacional de Eliminação de CFCs foi desenvolvido e foi determinada a eliminação deste componente até 2007. A principal alternativa criada na época para substituir os CFCs e HCFCs foi a utilização dos HFCs (Hidrofluorcarbonos).

Porém, mais um capítulo na história dos refrigerantes apareceu nos anos 90. A descoberta de mais um problema ambiental, e mais recente, o aquecimento global e os gases de efeito estufa. Além do consumo de energia e produção de CO₂ para produzir os refrigeradores, os próprios refrigerantes são por si só gases de efeito estufa.

Veio então o Protocolo de Kyoto, cujo principal objetivo é reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Dos gases cobertos pelo tratado, três deles eram amplamente utilizados na refrigeração, inclusive a alternativa do Protocolo de Montreal, os HFCs.

Atualmente, devido ao Protocolo de Kyoto e Montreal, alguns refrigerantes que haviam caído em desuso, voltaram a figurar com certa importância. Novas soluções estão em estudo e os chamados Fluidos Refrigerantes Secundários e Fluido Refrigerantes Naturais tem certo potencial e já são considerados como soluções de longo termo.

Além dessa preocupação com os refrigerantes, em relação a camada de ozônio e efeito estufa, é cada vez maior a preocupação com o consumo energético no nosso planeta. A cada dia torna-se maior a procura por equipamentos mais eficientes e que resultem em uma economia energetica global. Este assunto será mais aprofundado no tópico de Eficientização.

Para dar continuidade ao assunto, uma revisão sobre o princípio de funcionamento dos refrigeradores é importante para um maior entendimento de sua essência.

2.2.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de um refrigerador residencial é aparentemente simples. A função de um refrigerador é retirar calor do seu interior e rejeitá-lo ao exterior. Toda transferência de calor entre dois corpos se dá do corpo mais quente para o mais frio. Assim, o meio fluido que estiver passando dentro do refrigerador deve estar mais frio que o seu interior para receber calor do mesmo. Na parte externa do equipamento o fluido deve estar mais quente que o meio para poder liberar calor. Esta é a ideia de todo e qualquer sistema de refrigeração. Para tornar a refrigeração em algo eficiente, alguns fatos são importantes.

Primeiramente sabe-se que a troca de calor mais efetiva é através do calor latente, calor envolvendo troca de fase. Dado isto, a procura deve ser por fluidos que condensem a uma temperatura um pouco superior a temperatura ambiente, para os dias quentes uma boa consideração é de uma temperatura ambiente de 32°C, e que evaporem a temperaturas negativas, já que em um refrigerador o ideal é manter a temperatura interna um pouco acima do ponto de congelamento da água, ficando então entre 3°C e 5°C.

A maneira, então, de se chegar a pontos de condensação a temperaturas mais altas que à pressão atmosférica é justamente aumentando a pressão no fluido através do uso de um compressor, isto vai retardar a separação das partículas do fluido. E para um fluido ter seu ponto de evaporação a uma temperatura inferior à pressão atmosférica, o mesmo deve ter uma redução em sua pressão, facilitando a separação de suas partículas. Em um refrigerador este acontecimento é possível através de uma válvula de expansão. Sendo assim, um refrigerador deve ser composto de pelo menos quatro componentes. Segue uma ilustração de um refrigerador e seus componentes principais.

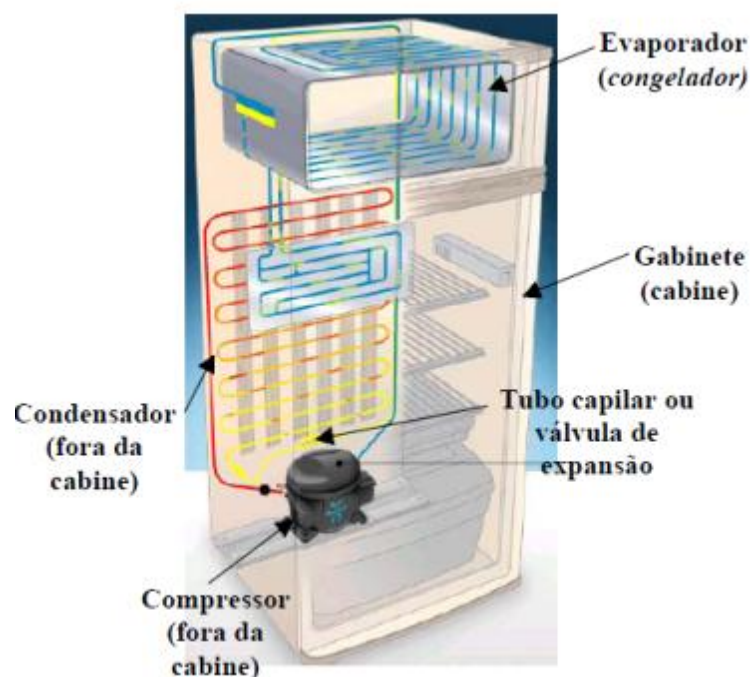


Figura 2.15 – Ilustração dos componentes de um refrigerador (Vendrusculo et al (2003)).

Para exemplificar um pouco melhor o que chamamos de ciclo de refrigeração, segue um passo a passo do que acontece com o fluido refrigerante dentro de um refrigerador. Primeiramente o fluido, em seu estado gasoso, entra no compressor a uma pressão e temperatura baixa. Em seguida o Compressor eleva muito rapidamente a pressão do fluido, e portanto sem tempo para que o mesmo troque calor com o compressor, considerando assim uma compressão adiabática, e com isso sua temperatura também aumenta. O fluido agora tem uma pressão e, principalmente, temperatura elevada e está pronto para perder calor para o meio externo, dentro de um trocador de calor, e começar a condensar. O nome deste trocador de calor é Condensador. Ao sair do condensador, o fluido encontra-se agora no estado líquido e seu próximo caminho é entrar no refrigerador. Porém, para conseguir perder sua

temperatura e roubar calor do interior do refrigerador o mesmo passa por um tubo capilar, Válvula de Expansão, em que o fluido começa a perder pressão expandindo e perdendo temperatura. Ao sair do tubo capilar o fluido está agora a uma temperatura baixa e pronto para retirar calor do interior do refrigerador. Ao receber este calor o fluido começa a evaporar dentro do trocador de calor, semelhante ao outro, porém agora por estar evaporando o trocador de calor chama-se Evaporador. Ao sair do evaporador, o fluido volta a ser gás e está pronto para entrar no compressor e recomear o seu ciclo. Segue uma ilustração do ciclo.



Figura 2.16 – Ciclo padrão de compressão a vapor (Fonte: Notas de Aula do curso de Instalações Termomecânicas I, Prof. Pimenta).

A figura acima ilustra o ciclo de refrigeração por compressão de vapor padrão. O ciclo padrão tem as seguintes características: A transformação entre 1 e 2 é considerada uma compressão adiabática, e portanto reversível, pois conforme explicado mais acima, a transformação ocorre muito rapidamente e, portanto sem tempo para trocas de calor. A transformação entre 2 e 3 é considerada isobárica, ou seja, sem perdas de pressão durante o processo. A transformação entre 3 e 4 é uma expansão irreversível isoentálpica, a transformação é considerada isentálpica pois não se admite transferência de calor com o meio externo, não existe trabalho realizado nem no meio externo nem pelo o meio externo, e não há perdas de energia cinética na transformação. A transformação entre 4 e 1 é semelhante à entre 2 e 3.

Porém, o ciclo acima não é o ciclo “real”. No ciclo real existe uma série de perdas que modificam o perfil do ciclo e que complicam consideravelmente os cálculos. No ciclo real existem perdas de carga no condensador (não só perdas de carga devido ao comprimento dos tubos mas principalmente devido as curvas na tubulação), perdas de carga no evaporador, motivos similares ao anterior, perda de carga nas linhas, perdas de carga nas válvulas de sucção e descarga, compressão não isentrópica, além de perdas e trocas de calor no compressor.

Em adição aos quatro componentes explicados nos parágrafos anteriores, existem ainda alguns outros componentes importantes que valem a pena comentar sobre seu funcionamento.

Primeiramente temos o Gabinete, figura 2.15. O gabinete forma e dá sustentação à estrutura do refrigerador e estão disponíveis em vários volumes. A profundidade e a largura são praticamente padronizadas. Entretanto, a altura varia com a capacidade (volume) do refrigerador.

O acumulador é um dispositivo de segurança para impedir que o refrigerante líquido flua para a linha de sucção e para o compressor. Se o refrigerante líquido tem a entrada no alto do evaporador, assim, todo o refrigerante líquido que fluir para dentro do acumulador será evaporado. Então, somente o vapor fluirá para a linha de sucção, fornecendo também alguma refrigeração. O acumulador é de importância fundamental, pois se o compressor for alimentado por um líquido poderá ter seu funcionamento bastante prejudicado. (CARMEIS, 2002).

A linha de sucção localiza-se atrás do gabinete do refrigerador, saindo da parte inferior do evaporador e estendendo-se até a parte lateral do compressor hermético, na base do gabinete (CARMEIS, 2002). A linha de sucção conduz o refrigerante vaporizado do evaporador ao compressor. A linha deve ser grande o bastante para transportar o refrigerante vaporizado com resistência mínima ao fluxo (PORTASIO, 1982).

O filtro secador é um acessório em formato de tanque que retém a umidade, a sujeira, os metais e as partículas estranhas, impedindo-as de incorporarem-se ao fluxo do refrigerante. A umidade é também prejudicial quando misturada ao óleo em um sistema, pois forma uma espécie de lama ácida que corrói as unidades herméticas (PORTASIO, 1982).

Apesar de já ter sido comentado anteriormente, um maior detalhamento sobre o tubo capilar e o compressor será apresentado.

Sobre o tubo capilar, após passar pelo condensador o refrigerante é submetido a um filtro secador (remove toda a umidade ou impureza) com seção transversal maior e daí flui por um tubo capilar, o qual tem o objetivo de fazer baixar a pressão do líquido pelo oferecimento de resistência à sua passagem (CARMEIS, 2002). A válvula consegue liberar o fluido a uma pressão cerca de 12 vezes menor que a da entrada. O refrigerante do tubo capilar é aspirado para dentro do evaporador, sob a forma de minúsculas gotas, através de um pequeno orifício. O tubo capilar é cuidadosamente calibrado no comprimento e no diâmetro interno para dosar a exata quantidade de líquido refrigerante exigido para cada unidade. A função secundária dessa válvula é controlar a vazão do líquido refrigerante ao evaporador do modo que o gás que sai esteja ligeiramente superaquecido. Isto é necessário porque o compressor é projetado para bombear apenas gás, e não líquido. Como dito anteriormente, se o líquido entrar no compressor podem ocorrer danos ao mesmo.

Em relação ao compressor, além de seu funcionamento padrão, alguns detalhes são particulares dos compressores para refrigeradores. O motor de um compressor hermético é inserido e lacrado dentro de uma abóbada ou carcaça juntamente com o compressor e, conectado diretamente a esse. A unidade é

geralmente montada sobre um sistema de amortecimento dentro da carcaça hermética para abrandar as vibrações do compressor, evitando que estas sejam sentidas externamente.

Feita esta revisão sobre o funcionamento de um refrigerador, segue uma revisão sobre temas mais condizentes com o projeto. O próximo tópico a ser abordado é sobre maneiras de melhorar a eficiência de um refrigerador.

2.2.2 Eficientização

Por apresentar poucos componentes, o refrigerador tem um número não muito grande de alternativas para sua efficientização. Um fator importante é o seu isolamento interno. Para um refrigerador, é importante não só resfriar o seu interior como também manter sua temperatura, ou seja, isolar o seu interior. Vamos as alternativas.

A primeira seria o aumento da espessura do isolamento das paredes e porta do refrigerador. A mesma pode ser muito significativa para a economia de energia. Cerca de 75% a 90% da energia consumida por um refrigerador pode ser atribuída ao desempenho térmico da camada de isolante. Entretanto, os fabricantes indicam que este não é o primeiro melhoramento de eficiência que seria considerado por causa dos grandes investimentos que seriam necessários para o aumento da espuma isolante. Para aumentar a camada de isolamento térmico de um refrigerador, seria necessário uma mudança na linha de produção da fábrica, por exemplo projetar e fabricar novas matrizes para moldar o novo gabinete e seus acessórios para que seja possível acomodar a nova espessura do isolante térmico. O aumento da eficiência se explica pois uma porção significativa do ganho de calor para os refrigeradores ocorre ao redor das extremidades da porta diretamente pela gaxeta. Desta forma, se a dimensão da gaxeta for aumentada ou se utilizar um material isolante com condutividade térmica mais baixa, a troca de calor através da gaxeta reduzirá, ocorrendo dessa maneira, um crescimento na eficiência no refrigerador. Um artigo escrito pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) descrevendo uma pesquisa com modelo teórico e experimental e colocando cargas de calor na gaxeta, observou que substituindo cerca da metade da flange de metal da porta ou do gabinete por uma de plástico, poderia implicar na redução do fluxo de calor na região da gaxeta em 25% (DOE, 1995).

Outra alternativa é a substituição do compressor hermético padrão para um compressor hermético de alto rendimento (maior eficiência). A eficiência do compressor tem melhorado significativamente com o passar dos anos e ainda hoje, avanços continuam ocorrendo. Como o compressor é o maior componente consumidor de energia do refrigerador, os avanços na eficiência do compressor têm efeitos significativos na eficiência global do refrigerador (VENDRUSCULO et al, 2003). Contudo, a conversão total para compressores de alto rendimento só poderá ser realizada em regime contínuo pelos fabricantes de refrigeradores no momento que ocorrer maior demanda desse dispositivo no mercado, o que forçaria a indústria para produzir produtos com preços mais competitivos.

Para exemplificar a importância de se aumentar a eficiência do compressor, alguns estudos mostram que um ganho importante de eficiência pode ser alcançado através de compressores de rotação variável. Um estudo Suíço de 2011 tinha como proposta a criação de um selo de qualidade superior ao máximo já instaurado no país. A ideia era reduzir em 30% o consumo do melhor refrigerador trocando o seu compressor e economizando 1,25 TWh por ano apenas na Suíça. O projeto se baseia em comparar o compressor do refrigerador de melhor qualificação do mercado com um compressor semelhante, porém com rotação variável. A diferença é que o compressor com rotação variável iria trabalhar num período bem maior que o original, quase que em regime permanente para manter a temperatura. Enquanto o compressor das geladeiras atuais ficam aproximadamente 26% do tempo ligado, o desse estudo fica quase 70% a uma rotação bem inferior à rotação original. O resultado alcançado pelo grupo de pesquisadores foi de uma economia de 27% apenas trocando o compressor. Já existe atualmente, uma série de compressores com aplicação residencial com rotação variável, como, por exemplo, os modelos VEG e VEM da Embraco, que apresentam uma eficiência de até 40% maior em comparação com os compressores de rotação constante, e que atualmente dominam o mercado de refrigeradores.

Para os condensadores, um afastamento desse componente da carcaça do refrigerador poderá facilitar a troca de calor do refrigerante superaquecido com o meio ambiente, uma vez que o condensador resfria o fluido superaquecido e promove a mudança de fase através da liberação de calor por radiação e convecção natural com o ar ambiente (VENDRUSCULO et al, 2003). Com o afastamento, o ar poderá circular com maior liberdade através do condensador e, entre o mesmo e a parte de trás do refrigerador. Com essas mudanças, será necessário utilizar menos energia elétrica no ciclo de refrigeração e ao mesmo tempo aumentar a eficiência do refrigerador. Contudo, deve ser levado em consideração o tamanho das cozinhas brasileiras, logo a disponibilidade deste espaço, etc.

Por fim, um estudo feito por pesquisadores da Unicamp tinha como objetivo analisar os efeitos na troca de calor no condensador ao imergir o trocador de calor em um reservatório com fluxo de água. A ideia é aumentar a troca de calor no condensador substituindo o fluido em contato com o condensador, trocando o ar por água e aproveitando o efeito evaporativo, diminuindo a temperatura de condensação do fluido refrigerante. Os ensaios seguiram as normas da ABNT 12888. O desempenho alcançado pelos pesquisadores foi uma diminuição em 10 graus na temperatura de condensação, e portanto aumento o COP do refrigerador, em 24%, e como consequência, um aumento de eficiência em 15% no consumo de energia (GUTIERREZ et al, 2010). Um dos contratempos encontrados pelos pesquisadores é que a água contida no reservatório deve ser constantemente tratada química ou fisicamente para evitar a formação de algas, bactérias, ou incrustações.

As várias opções para aumento de eficiência em um refrigerador foram citadas para demonstrar que existem uma série de opções e, mais ainda, uma preocupação mundial por um aumento na eficiência deste eletrodoméstico, que tem uma participação enorme no consumo elétrico mundial. Não restam

dúvidas que este é um equipamento que será alvo de constantes modificações e aperfeiçoamentos nos próximos anos.

Dando seguimento ao intuito deste projeto, o tema a seguir é o gerenciamento do refrigerador, o controle do seu funcionamento. Segue uma revisão sobre este assunto.

2.2.3 Controle

O dispositivo que controla o funcionamento de um refrigerador é o termostato. O termostato é um dispositivo que faz o contato de liga e desliga do compressor.

Seu funcionamento é bastante simples. Um pequeno tubo de aproximadamente 1 a 2mm de diâmetro que fica encostado na parte de trás do evaporador, é o sensor de temperatura, que faz parte do termostato. Como já foi escrito anteriormente, este é o chamado Tubo Capilar, que é preenchido com certo gás, o gas refrigerante escolhido pelo fabricante. A outra extremidade termina em um diafragma de metal, que se apóia em um balancim com mola para acionamento do contato. A variação de temperatura no tubo provoca a dilatação ou contração do gás em seu interior, movimentando o diafragma e acionando o contato. A regulagem da distância do contato ou da pressão da mola permitirá a alteração da temperatura de abertura do contato. Esta é realizada pelo botão de "regulagem de temperatura" da geladeira. Quanto maior o número, menos o diafragma necessita dilatar para ligar o compressor, e portanto maior a temperatura em seu interior.

Feito o contato, o compressor recebe a alimentação elétrica e começa o ciclo de refrigeração. Com isto, o compressor começa a retirar calor do interior do refrigerador até alcançar a temperatura em que o gás do diafragma (bulbo) do termostato se contraia e abra o circuito. O compressor é desligado e o calor para de ser retirado. Quando a temperatura subir um pouco, os contatos se fecham novamente, o compressor volta a retirar calor e o ciclo se reinicia. Desta forma, consegue-se manter a temperatura dentro de uma faixa desejada. Segue uma ilustração de um termostato. É importante notar que o termostato apresenta certa histerese e por isso que ele não liga e desliga na mesma temperatura, ou seja, para voltar ao estado inicial, o próximo “ciclo” necessita de uma energia maior.

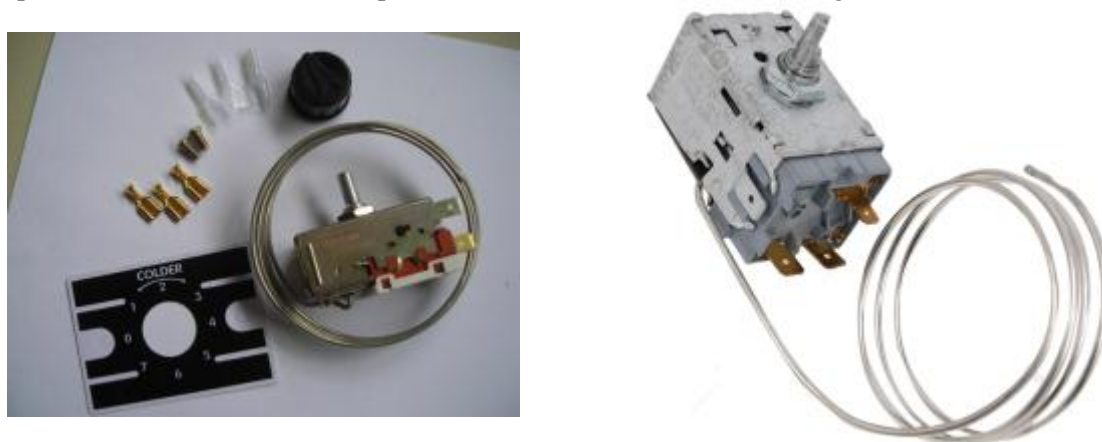


Figura 2.17 – Modelos de Termostatos para Refrigerador.

Portanto, é a regulação do termostato que define, basicamente, o controle de um refrigerador. É o termostato que define a variação de temperatura interna no refrigerador e é ele quem faz o controle de ligar e desligar o compressor. Este é o componente que o projeto espera controlar de uma maneira diferente, forçando o acionamento do compressor em horários fora do horário de pico de demanda. Para isso é necessário estudar mais sobre o tema deste tópico, segue uma revisão mais profunda sobre sistemas de controle.

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE

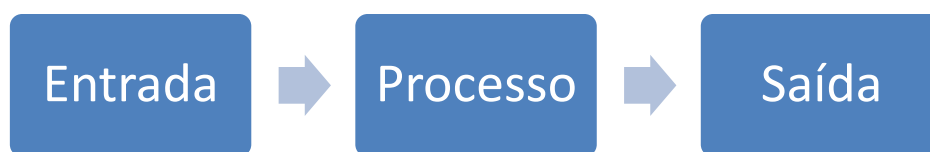
O desenvolvimento dos sistemas de controle automático permitiu grandes avanços em praticamente todas as áreas da tecnologia e do conhecimento humano incluindo, e não se restringindo, a realização de tarefas de forma mais precisa e segura. Esse desenvolvimento permitiu o crescimento da indústria ao realizar tarefas repetitivas e desgastantes mantendo um padrão de qualidade elevado e reduzindo o tempo de produção por peça.

O florescimento dos estudos sobre sistemas de controle contribuiu para o aumento do conforto trazido pelos bens de consumo, que passaram a apresentar regalias antes inimagináveis, incluindo a capacidade de monitoramento de seu funcionamento para que se atinjam níveis excepcionais de qualidade e eficiência no funcionamento.

As aplicações dos sistemas de controle são infinitas na prática e em suma estão presentes em quase todas as formas de tecnologia com as quais interagimos.

2.3.1 Introdução

Os sistemas de controle podem ser representados como um processo que tem pelo menos uma entrada e uma saída.



O processo é o sistema a ser controlado, que é modelado como um sistema dinâmico representado por um conjunto de equações diferenciais que descrevem seu comportamento.

Dentre estas equações pelo menos uma deve relacionar o processo com a variável de entrada – ou variáveis de entrada - que também é chamada de variável de controle. Variações na entrada resultam em alterações na saída de acordo com as equações que regem o processo.

Analogamente, a saída é representada por um conjunto de variáveis chamadas de variáveis controladas que respondem à variações das variáveis de entrada, assim como à distúrbios externos.

Então, pode-se entender que o trabalho de um sistema de controle é de aplicar nas variáveis de entrada sinais adequados para que as variáveis de saída converjam para uma faixa de valores aceitáveis dentro do processo, como a temperatura em um forno, ou apresentem um comportamento em particular, como em um sistema de piloto automático de um carro por exemplo.

Neste trabalho serão abordados os conceitos sobre controle automático essenciais para que se situe o funcionamento do refrigerador e as características de sistemas de controle similares, como por exemplo os utilizados em sistemas de climatização, fornos, controladores de humidade, entre outros.

2.3.2 Tipos de Sistema de Controle

Podemos classificar os sistemas de controle primeiramente em dois grandes grupos que são distintos pela forma a qual a variável de saída é tratada.

Nos sistemas de controle em Malha Aberta a estratégia consiste em aplicar um sinal pré-determinado na entrada e assim obter uma saída pré-determinada, que pode ser prevista através de modelos matemáticos, testes prévios ou calibrações. De forma mais completa, não se acompanha a evolução do processo para determinar como o sinal de entrada deve se comportar para que se atinja a saída desejada. Não há realimentação da variável de saída para ajustar o processo.

Geralmente sistemas de controle em malha aberta são utilizados quando a complexidade do processo é baixa, pouco influenciável por perturbações externas ou deseja-se manter custos de produção em valores mínimos. Um bom exemplo de um sistema de controle em malha aberta é o da lavadora de roupas. Determina-se o programa de lavagem desejado e em uma sequência determinada a máquina realizará operações com durações pré-determinadas: molho, lavagem, enxague, centrifugação. A qualidade da lavagem não é levada em consideração pela máquina. Não há um sistema que permita avaliar o estado das roupas e indicar se o equipamento deva prolongar o tempo de molho ou lavagem ou se as roupas estão suficientemente secas.

A necessidade de se controlar processos de forma mais estrita é realizada em sistemas de controle em Malha Fechada. Nos sistemas de controle em malha fechada a evolução ou andamento do processo, monitorados através do comportamento da variável de saída, são realimentados no sistema de forma a orientar o sinal aplicado na variável de entrada, a fim de corrigir o andamento do processo ou compensar distúrbios externos ao processo.

A figura a seguir ilustra de forma clara a diferença entre os dois sistemas:

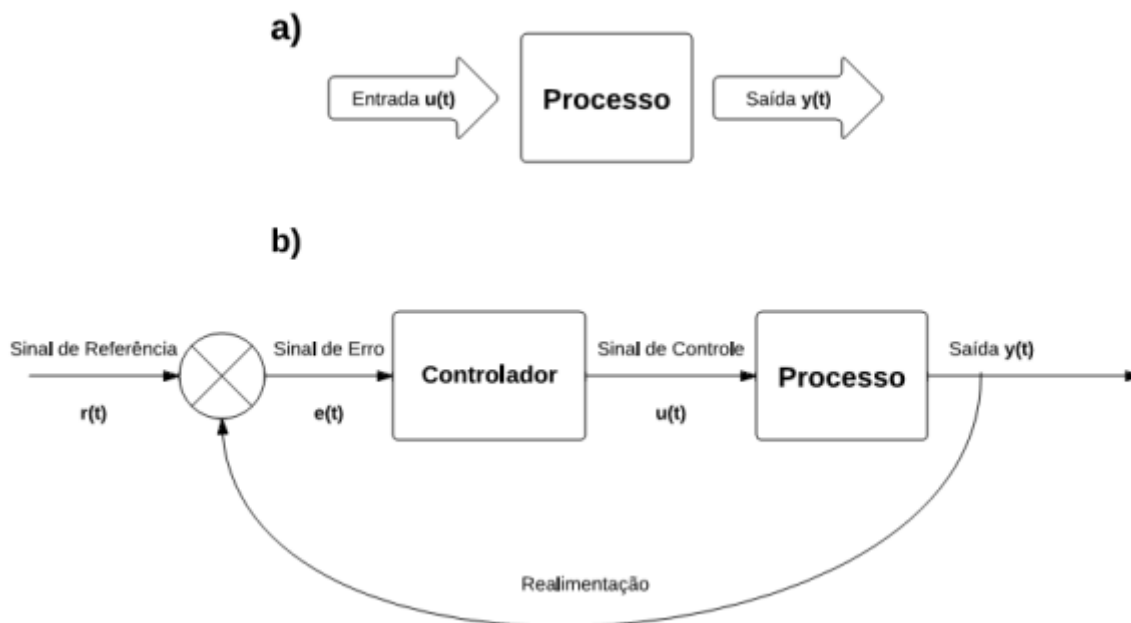


Figura 2.18 - Sistema de controle em malha aberta (a) e Sistema de controle em malha fechada (b)

Pode-se notar que a grande diferença entre os dois sistemas, como já citado anteriormente, é a existência de uma realimentação da saída juntamente com o sinal de entrada ou referência.

De forma geral, a fim de se aumentar a precisão ou confiabilidade do sistema de controle compara-se o sinal de saída $y(t)$ com o sinal de referência $r(t)$, também chamado de *set-point*, de forma a se determinar um erro ou desvio, representado na figura por $e(t)$.

A função do controlador é determinar, a partir do conhecimento de $e(t)$ e das equações que regem o sistema, qual sinal $u(t)$, chamado de sinal de controle, deve ser aplicado ao processo controlado de forma que o sinal de saída, $y(t)$, fique dentro de valores desejáveis ou obedeça a um comportamento específico.

Sumarizando, o uso de sistemas de controle em malha fechada permite trabalhar com:

- Sistemas mais precisos;
- Rejeitar o efeito das perturbações externas, incluindo seu efeito no sinal de erro ou desvio;
- Otimizar a dinâmica do sistema de forma a permitir realizar operações antes infactíveis com os sistemas de malha aberta;
- Tornar o sistema robusto, ou seja, pouco sensível a variabilidades no processo;

2.3.3 Controladores Automáticos

Já dentro do campo do controle realizado em malha fechada, pode-se construir o conceito básico de um controlador industrial automático, que é constituído de uma série de elementos básicos que juntos realizam a tarefa programada.

Esta tarefa, como já mencionado anteriormente, é manter o valor de uma variável importante ao processo dentro de uma faixa de valores programada ou realizando um padrão específico.

Na figura a seguir temos o diagrama de blocos de um controlador automático genérico:

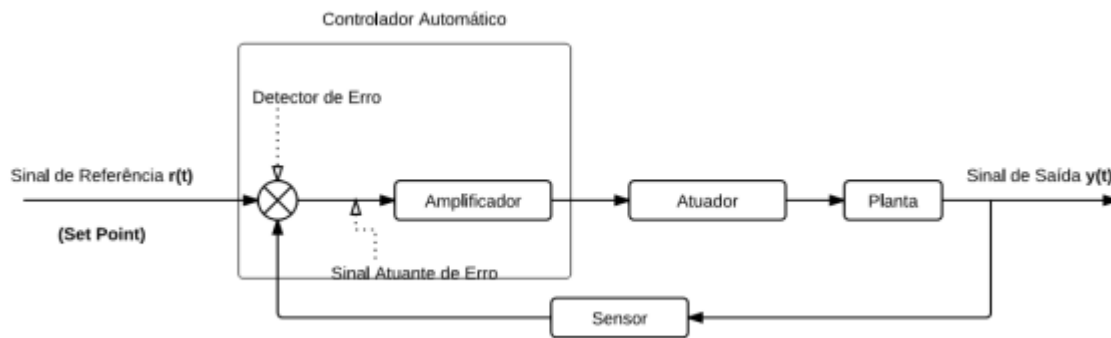


Figura 2.19 - Representação de um controlador automático genérico

Vemos que o controlador automático recebe em seu detector de erro dois sinais: o de referência e o capturado na saída através de um sensor.

O sensor, também chamado de transdutor, tem como função medir o sinal de saída e transformá-lo em um sinal útil para o controlador automático, sendo esta a parte de realimentação do controlador.

No detector de erro, a diferença entre a referência e o valor mensurado na saída geram um sinal, geralmente de baixa potência que na sequência é amplificado.

Este sinal amplificado irá comandar um atuador - que pode ser um motor elétrico, um componente hidráulico ou pneumático ou outros vários - que agirá a fim de se levar o sinal de saída para próximo da referência na planta onde se realiza o processo.

A depender da forma como o controlador automático gera o sinal atuante, estes podem ser classificados em algumas categorias:

- Controladores de duas posições ou controladores *on/off*;
- Controladores Proporcionais – P;
- Controladores Integrais – I;
- Controladores Proporcionais e Integrais – PI;
- Controladores Proporcionais e Derivativos – PD;
- Controladores Proporcionais, Integrais e Derivativos – PID;

Além destes o controlador pode ser classificado também em relação a forma do meio que transmite a potência: elétrico, hidráulico, pneumático, etc. A escolha do controlador a ser utilizado depende de fatores comuns de projetos de engenharia, como custo, precisão, confiabilidade e outros.

Para este trabalho os controladores de duas posições ,ou *on/off*, serão analisados por serem utilizados nos refrigeradores domésticos. Fica fora do escopo deste trabalho os controladores P, I, PI, PD e PID.

Os controladores *on/off* são largamente utilizados por dois motivos: simplicidade e custo reduzido, e assim são encontrados tanto na indústria como em aplicações domésticas.

2.3.4 Controladores *on/off*

Como o próprio nome indica, os controladores do tipo *on/off*, possuem como funcionamento do atuador somente dois estados, geralmente ligado e desligado.

Controladores do tipo *on/off* são geralmente dispositivos elétricos que consistem de uma válvula do tipo solenóide que é acionada pelo controlador e assim, liga ou desliga o atuador.

Consideremos o sinal atuante de erro como $e(t)$ e $u(t)$ como o sinal de saída do controlador para o atuador. Como o controle *on/off* exibe somente dois estados possíveis para o atuador, iremos definir como constantes U_1 e U_2 , que representam os estados possíveis para $u(t)$ que irão depender do sinal de $e(t)$.

Temos assim:

$$u(t) = U_1, \text{ para } e(t) < 0; \text{ Caso 1}$$

$$u(t) = U_2, \text{ para } e(t) > 0; \text{ Caso 2}$$

Tomemos como exemplo o controle automático de um refrigerador doméstico. A válvula termostática, já apresentada detalhadamente no capítulo anterior, exerce o papel do controlador *on/off*.

O sinal de referência é indicado pelo usuário no seletor de temperaturas, e é comparado com a medida indireta da temperatura no interior da geladeira realizada no bulbo do dispositivo.

No caso da temperatura lida pelo bulbo ser maior do que o sinal de referência mais $\Delta/2$ temos que $e(t) < \Delta/2$, e nesse caso o compressor será acionado, então definiremos assim $U_1 = 1$ o estado que define o compressor ligado. Analogamente no caso em que $e(t) < -\Delta/2$, temos $U_2 = 0$, que indica o compressor desligado pelo fato da temperatura no interior do refrigerador ser menor do que o sinal de referência menos $\Delta/2$.

Segue um funcionamento esquematizado pelo seguinte gráfico:

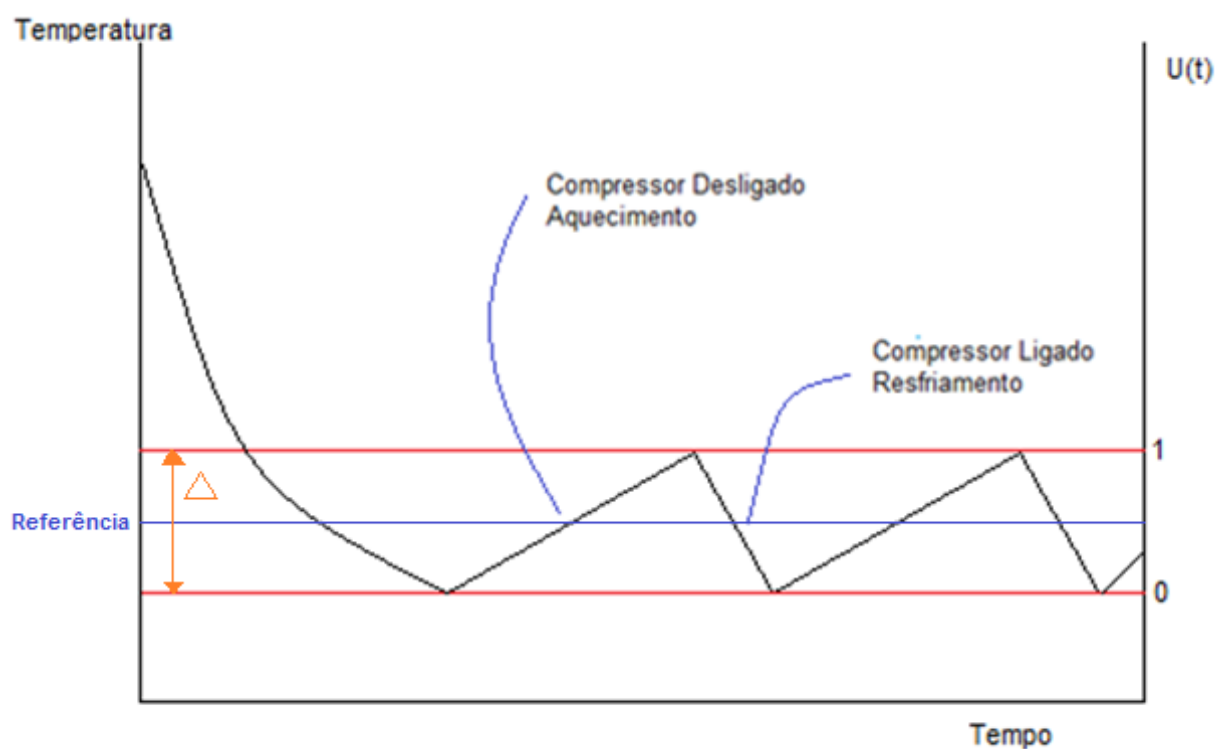


Figura 2.20 - Representação do controle da temperatura e sinal de referência

O ajuste de temperatura regula simultaneamente as temperaturas para início e fim dos ciclos de aquecimento e resfriamento, promovendo um maior número de partidas e paradas do compressor e uma temperatura mais estável dentro do refrigerador.

Quando em regime permanente de funcionamento, o refrigerador operará entre as duas temperaturas definidas pelo estado de ajuste do equipamento, repetindo os ciclos de resfriamento e aquecimento em um período mensurável.

Observada essa característica abrimos caminho para entender a proposta do equipamento, objeto deste trabalho.

3. EQUIPAMENTO PROPOSTO

Neste capítulo é apresentado o equipamento proposto neste trabalho, que consiste em um placa contendo componentes eletrônicos e um microprocessador com a programação necessária para atingir os objetivos do trabalho.

Este equipamento pode ser de grande relevância para aplicações de engenharia, sobretudo para o controle da demanda de pico. Além disso, este equipamento pode ser adaptado para outros aparelhos residenciais como ar condicionados, aquecedores elétricos e dispositivos encontrados na indústria que apresentem uma variável de controle em sistema *on/off*.

Compõe este capítulo, as apresentações do conceito do equipamento, de sua estratégia de controle, hardware, software, além dos testes e resultados.

3.1 CONCEITO

Como descrito no capítulo 1, o projeto pretende desenvolver um equipamento que possa deslocar o período de funcionamento do compressor para fora do período de ponta da rede.

Como visto na revisão bibliográfica, o componente que fecha o circuito que aciona o compressor é o termostato. Portanto, para atingir o objetivo do projeto, é necessário que este equipamento consiga acionar o termostato em circunstâncias fora do seu comportamento “natural”, para isto utilizando um relé em paralelo com o supracitado.

Dado isto, a estratégia do projeto é criar um mecanismo que acione o contato do termostato de maneira forçada no horário calculado para que o refrigerador inicie o horário de pico exatamente após o compressor ter sido desligado.

Para se determinar quando o compressor será acionado forçadamente o equipamento terá, inicialmente, uma fase de “aprendizado”. Nesta fase o equipamento será “conectado” ao compressor e armazenará as informações referentes aos horários em que o compressor for ligado, quanto tempo permaneceu ligado, quando foi desligado e quanto tempo permaneceu desligado.

O intuito deste período de aprendizado é determinar o tempo médio que o compressor fica ligado por ciclo e em quanto tempo o compressor será acionado novamente. Sabendo esses tempos médios, o horário de pico e a hora atual, o equipamento deve planejar novos horários de acionamento que evitem o consumo de energia no horário de pico da região.

A priori, o período de aprendizado do equipamento será de 24 horas. Caso os experimentos iniciais mostrem que o período deve ser aumentado, para diminuir a chance de obter dados que não representem o comportamento “normal” do compressor, uma simples mudança no código computacional resolverá o problema.

Observações indicam que durante o horário de pico o compressor do refrigerador pode ser acionado diversas vezes, caso o usuário abra e feche diversas vezes o equipamento durante este horário.

O projeto está ciente de que provavelmente nem todos os acionamentos durante o horário de pico de demanda poderão ser evitados. O objetivo, no entanto, é de diminuir ao máximo o número de acionamentos e analisar os impactos dessa diminuição.

Para ilustrar o retrato térmico de um refrigerador, alguns dados foram obtidos durante a pesquisa bibliográfica. Segue abaixo alguns retratos dos ciclos de funcionamento de refrigeradores residenciais.

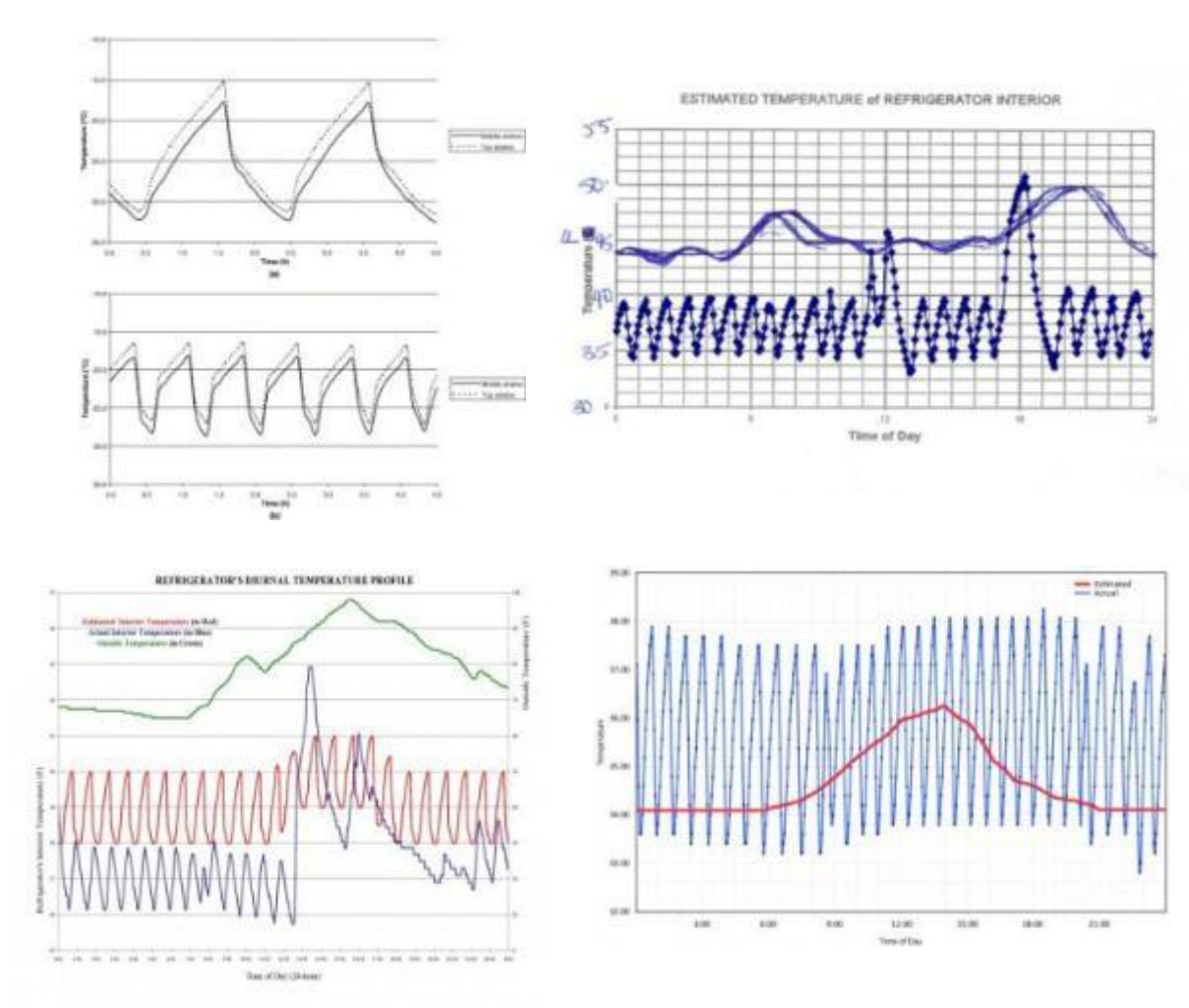


Figura 3.1 – Exemplo de retratos térmicos de refrigeradores residenciais.

A figura 3.1, apesar de não apresentar dados detalhados, indica a tendência de que o tempo para o refrigerador ser resfriado é bem menor que o tempo para o aquecimento do seu interior. Estes dados não só reforçam o que seria considerado “natural”, como também o que foi apresentado neste relatório, que o percentual em que o compressor fica ligado é de 26% do tempo total. Além disso, observa-se um comportamento de aumento na temperatura interna média do refrigerador entre o meio dia e às 16 horas, devido ao aquecimento natural ao longo do dia.

Vale ressaltar que o projeto não vai impedir o acionamento do compressor. Caso a temperatura chegue ao nível em que o termostato faz o contato elétrico, o equipamento não irá impedir que o compressor seja ligado à rede, garantindo a conservação dos mantimentos.

3.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O equipamento terá dois modos, o modo de Aprendizado e o modo Normal.

O que definirá o uso de um modo ou outro será os dados guardados na memória do equipamento proposto. Os dados indicarão a existência ou não de medições anteriores, como a média de tempo em que o compressor fica ligado.

O fluxograma abaixo ilustra o processo de tomada de decisão do equipamento ao ser ligado à rede:

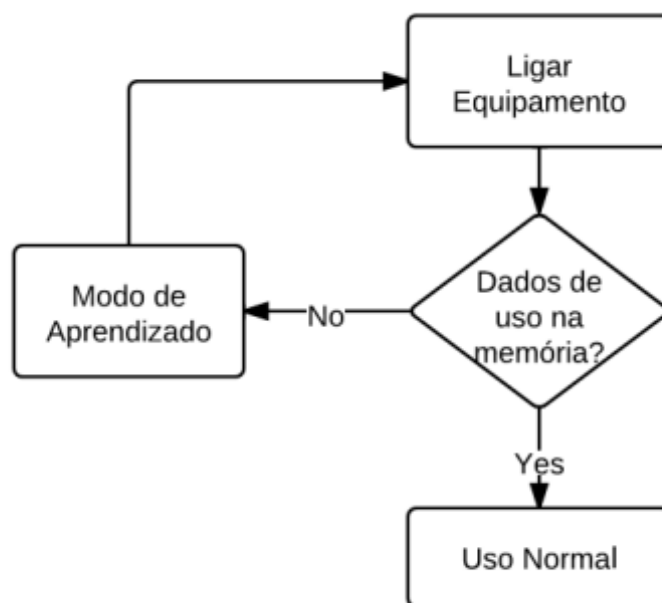


Figura 3.2 – Fluxograma para tomada de decisão do modo a ser executado.

No caso em que o equipamento está sendo utilizado pela primeira vez, e logo não tem dados de uso armazenados, este iniciará sempre o modo de aprendizado, e ao seu término, iniciará a operação normal.

Existirão casos em que o equipamento terá dados de uso na memória não-referentes ao refrigerador a que ele está ligado, como no caso em que há troca de um refrigerador antigo que já fazia uso do equipamento proposto. Para estes casos será instalado um botão que permite limpar os dados armazenados na memória, forçando um novo modo de aprendizado.

Tal recurso poderá e deverá ser utilizado no caso em que o refrigerador no qual o equipamento está instalado esteja em uma região geográfica com uma diferença climática sazonal elevada. Assim, o regime de operação no verão diferirá bastante do observado no inverno, assim, iniciar um modo de aprendizado na mudança das estações do ano é além de recomendado, necessário para o bom funcionamento do equipamento. Seguem nas próximas seções, detalhamentos sobre cada modo de operação.

3.2.1 Modo de Aprendizado

Ao ser ligado e verificado que o equipamento deve entrar em modo de aprendizado, o equipamento espera a partida do compressor. Uma vez que o compressor arranca, um cronômetro dispara e começa a contar o tempo em que o compressor fica ligado. Uma vez que o compressor para, este tempo é salvo na memória. Definimos este tempo de compressor ligado como *Up Time* (U).

Também após a parada do compressor, o cronômetro é reiniciado e conta até a próxima arrancada do compressor. Mais uma vez este tempo é salvo, e definimos este tempo como *Down Time* (D).

Ao término das 24 horas, o sistema calcula a média dos *Up Times* e *Down Times* e salva na memória os dados necessários para dar início ao modo normal.

Segue o fluxograma das etapas deste modo.

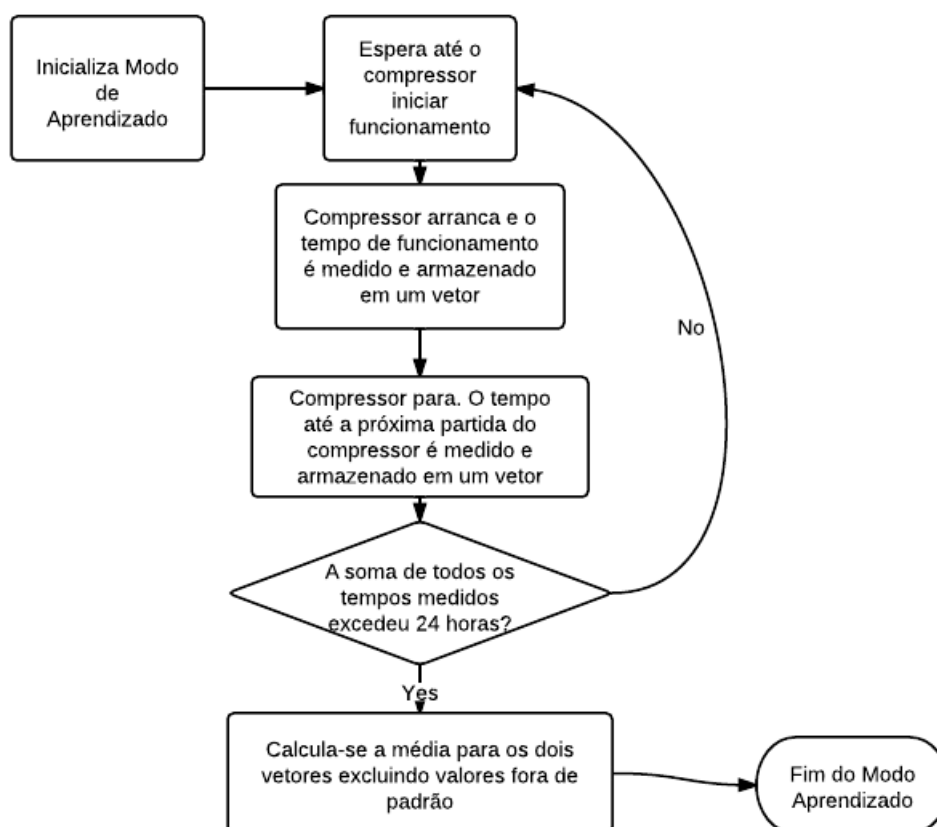


Figura 3.3 – Fluxograma do Modo de Aprendizado.

3.2.2 Modo Normal

No modo normal a tomada de decisão se torna um pouco mais complexa.

Para realizar a decisão o sistema precisa de algumas informações: *Up Time* e *Down Time* médios, hora local e horário de pico definido. Os dois primeiros dados são fruto do modo de aprendizado e os dois seguintes vêm programados “de fábrica”.

Na sequência segue fluxograma deste modo de operação:

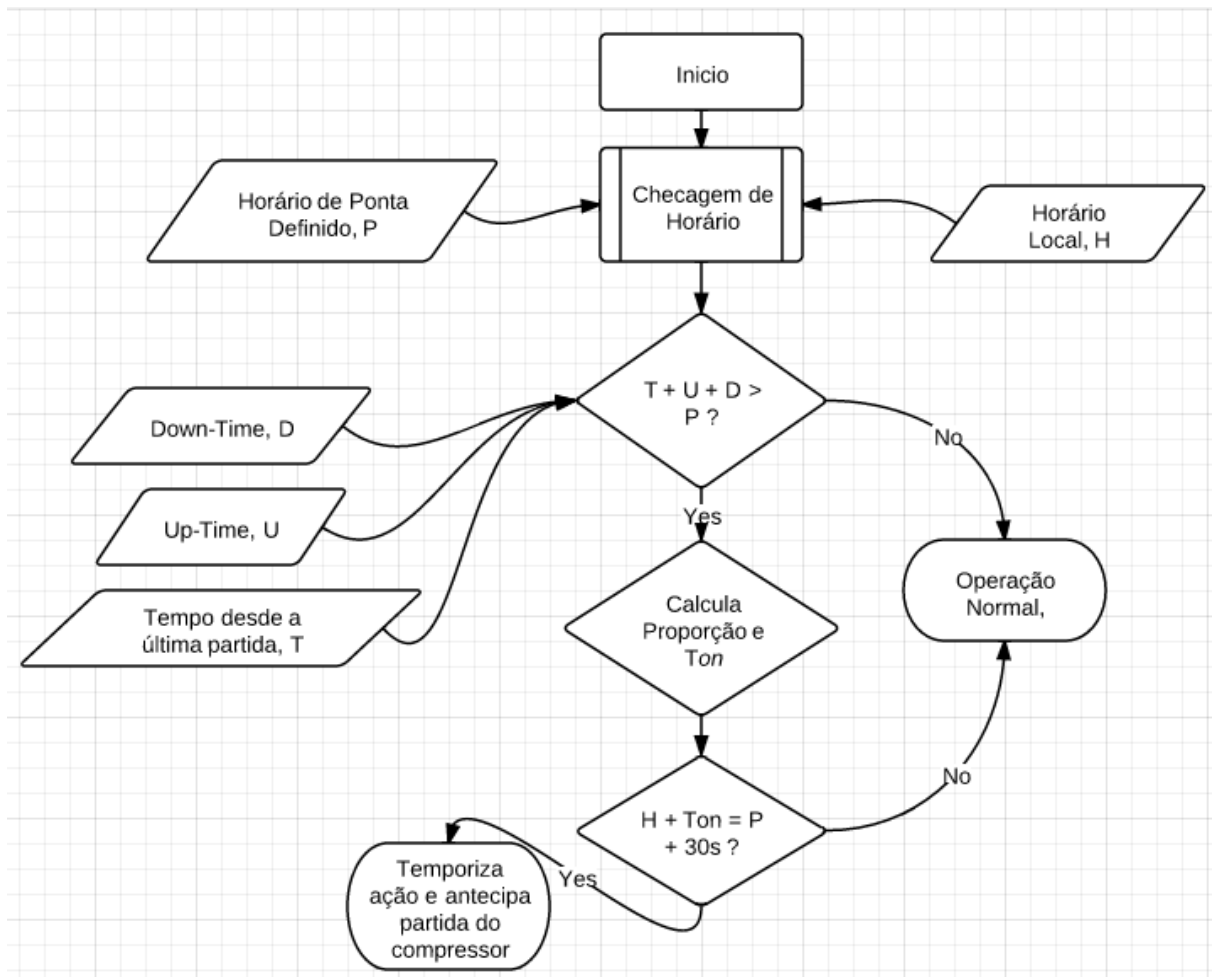


Figura 3.4 – Fluxograma do Modo Normal.

Primeiramente o algoritmo verifica se o tempo desde a última partida mais o tempo médio de *Down Time* mais o *Up Time* for maior que o horário de pico. No caso verdadeiro significa que não se pode esperar o compressor ligue de maneira “natural”, pois o seu acionamento ocorrerá no horário de pico.

$$T + D + U > P \quad (3.1)$$

D – *Down Time*;

T – Tempo desde a última parada do compressor;

U – *Up Time*;

P – Início do horário de pico;

Satisfeita esta condição, sabe-se que o equipamento deve acionar o compressor de maneira forçada. Porém, deve-se realizar o seu acionamento no período ótimo, ou seja, esperar ao máximo para acionar o compressor e o desligá-lo segundos antes do início da hora de pico.

É importante também atentar ao fato de que o compressor deve ser acionado durante um tempo que não prejudique a qualidade dos alimentos no interior da geladeira. Isto poderia acontecer caso o acionamento forçado viesse logo após um acionamento natural da geladeira, durante muito tempo. É importante, portanto, calcular por quanto tempo deve ser feito este acionamento.

Na situação ideal, ou seja, na situação em que o compressor deve ser ligado de maneira forçada durante a média obtida no período de aprendizado, a parte à esquerda da equação 3.1 tem que se igualar ao horário de pico.

Nas demais situações, o tempo do último acionamento será sempre maior que o ideal e, portanto, o compressor deve ser ligado de maneira proporcional à ideal. A proporção deste acionamento será:

$$\text{Proporção} = \frac{P - D - U}{T} \quad (3.2)$$

O tempo que o compressor deverá ser acionado de maneira forçada será, portanto:

$$T_{on} = \text{Proporção} * U \quad (3.3)$$

T_{on} – Tempo de acionamento forçado do compressor;

Por fim, basta apenas decidir que horas este compressor será acionado. O momento ideal para o acionamento dele é quando a seguinte equação for satisfeita:

$$H + T_{on} = P + 30 \quad (3.4)$$

Esta lógica nos permite fazer com que o compressor seja ligado em um momento tal que, no momento em que o compressor desligue, falem no máximo alguns segundos para o início do horário de pico.

Vale ressaltar que toda vez que o compressor é acionado, o cronômetro é zerado no momento em que o compressor é desligado, justamente para poder contabilizar o parâmetro T, indicado na equação 3.1.

Elaborada a lógica de operação passemos ao *hardware* utilizado para se obter um equipamento funcional.

3.3 HARDWARE

A estratégia do projeto consiste em quatro questões fundamentais que definirão a configuração do *Hardware* deste projeto. Os principais itens que definirão a arquitetura do hardware deste projeto são:

- Como o equipamento irá reconhecer se o compressor está *on* ou *off*.
- Como saber que horas cada atividade foi realizada.
- Como realizar a comunicação entre computador e microprocessador para fins de desenvolvimento.
- Como o equipamento irá acionar e desligar o compressor.

Através de muita pesquisa e contato com pessoas que trabalham com este tipo de problema, o projeto identificou que para cada um dos itens acima existe um grupo de componentes que resolvem cada problema separadamente. Em cada subseção será apresentado os componentes utilizados na concepção do equipamento. Vale ressaltar que cada grupo de componentes será interligado a um microprocessador que controlará o funcionamento de todos.

3.3.1 Como o equipamento irá reconhecer se o compressor está *on* ou *off*

Esta parte do projeto foi a mais crítica e apresentou impedimento à conclusão total do projeto.

Atualmente existem alguns componentes que são específicos para este tipo de aplicação – identificação de campos magnéticos - como os *Reed Switchs*, os sensores de Efeito Hall e até mesmo bobinas indutoras.

O *Reed Switch* é basicamente um interruptor que muda sua chave na presença de um campo magnético. É um equipamento bastante simples e que pode ser muito sensível.

Para o circuito previsto no projeto, o *Reed Switch* poderia ser instalado próximo ao cabo que alimenta o compressor ou próximo à sua carcaça. Ao compressor ser acionado, a corrente alternada induz um campo magnético que é sentido pelo *Reed Switch*. Uma vez que o componente sente este campo magnético ele muda o seu contato, fechando o circuito, e uma tensão chega ao microprocessador.

O microprocessador receberá esta tensão como um sinal indentificando o início do tempo em que o compressor fica ligado. Uma vez que o compressor é desligado, e portanto cessando o campo magnético, o *Reed Switch* abre seu contato, abrindo o circuito e interrompendo a passagem de corrente até o microprocessador. O intervalo de tempo entre um evento e outro é contabilizado como o *Up Time* do compressor.

Vale lembrar que um relógio continuará contando o tempo entre o desacionamento do *Reed Switch* e o acionamento subsequente, contabilizando assim o *Down Time*.

Importante observar que o uso apenas do *Reed Switch*, assim como para os demais componentes que podem realizar esta mesma atividade, não é o suficiente para o circuito. Além de enviar o sinal para o

microprocessador, este circuito tem alguns outros componentes a fim de formar uma espécie de filtro que evite múltiplos acionamentos em curtos períodos de tempo, situação incompatível com o funcionamento do refrigerador.

Segue um modelo de como deve ser o circuito necessário para enviar um sinal de qualidade ao microprocessador e evitar falhas nesse envio utilizando um *Reed Switch*.

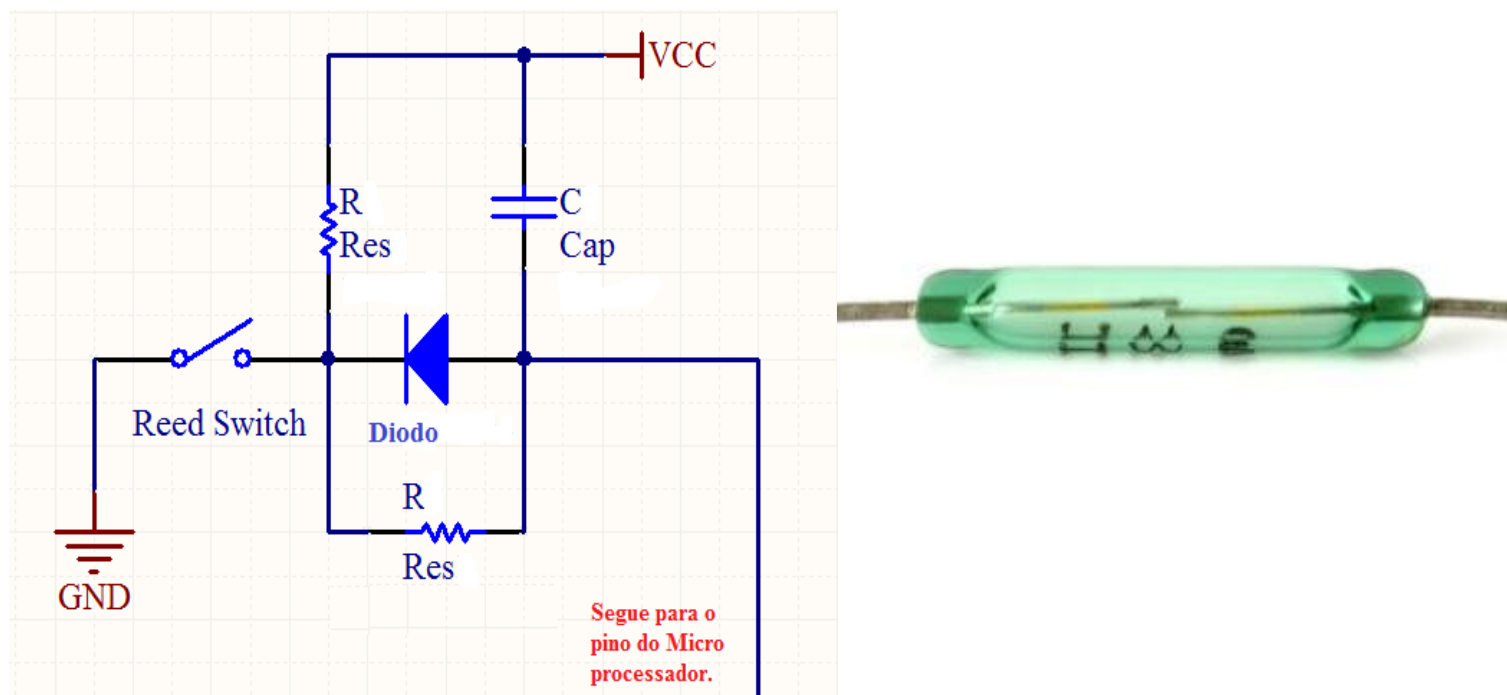


Figura 3.5 - Modelo de Circuito para *Reed Switch* e foto real do componente

Na figura acima observa-se o uso, além do *Reed Switch*, o uso de um capacitor, um diodo e dois resistores.

O capacitor é um componente que armazena energia elétrica, por meio de um campo elétrico. O seu papel no circuito é evitar o envio do sinal caso o contato seja aberto e fechado muito rapidamente. Esses sinais não seriam representativos para o projeto pois não corresponderiam ao acionamento ou desligamento do compressor e sim variações do circuito. Com isso os capacitores servem, para este circuito, para estabilizar o sinal que chega ao microprocessador, garantindo que somente os sinais que realmente são oriundos do funcionamento do compressor cheguem ao microprocessador.

O diodo é um componente que, basicamente, permite a passagem de corrente em um sentido e bloqueia no sentido contrário. Seu papel no circuito é de impedir que corrente elétrica chegue no *Reed Switch* oriunda do microprocessador.

Já o resistor é um componente que dissipa energia. Seu papel no circuito é manter a corrente a um valor baixo, evitando danos ao microprocessador e aos demais componentes.

Outra possibilidade para esta mesma aplicação é utilizar um sensor de efeito hall. Na sequência apresenta-se um circuito típico para se utilizar o sensor de efeito hall como uma chave e uma foto do componente real:

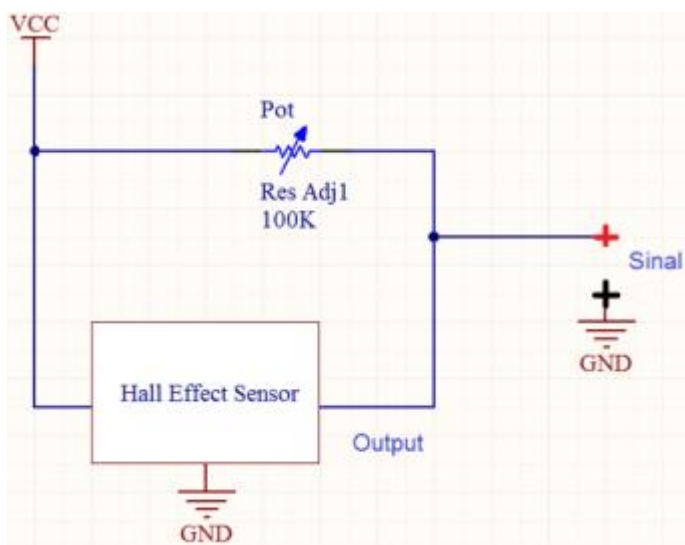


Figura 3.6 – Sensor de Efeito Hall modelo S41 e Circuito para sua utilização

Este componente de estado sólido não possui partes móveis - sendo assim teoricamente mais robusto – e gera uma tensão variável em seu pino de saída, proporcional ao campo magnético sentido por ele.

Os sensores de efeito hall apresentam sensibilidade elevada e podem ser usados em diversas aplicações, desde chaves e sensores de proximidade e rotação até medidores de corrente.

Em nossa aplicação pretendemos apenas que o sensor acuse a presença ou não de um campo magnético gerado quando do arranque do compressor.

Ao contrário do *Reed Switch* que apresenta somente dois estados – aberto ou fechado – que é característica de um sensor digital, o sensor de efeito hall apresenta comportamento analógico proporcional à intensidade do campo magnético no qual está inserido.

Para utilização neste projeto, será necessário a utilização de um circuito que faça com que o efeito do sensor hall seja compreendido como um sensor digital, ou uma chave, indicando a presença de campo magnético ou não.

Existem alguns métodos para tal, e um que se adequa ao projeto é realizar a medição da tensão indicada pelo componente quando o compressor for ligado e quando o compressor for desligado. Conhecendo tais, utiliza-se um resistor em série com o sensor a fim de criar uma queda de tensão que impeça o processador de reconhecer o sinal oriundo do campo residual. Como resultado, o processador perceberá o sinal apenas quando o compressor for acionado.

3.3.2 Como saber que horas cada atividade foi realizada

Apesar de um microprocessador já ter um clock interno, como boa prática para esse tipo de aplicação é aconselhável o uso de um relógio dedicado somente para a contagem precisa do tempo.

Para isso o projeto decidiu incorporar ao circuito um *Real Time Clock* (RTC), circuito integrado que - a partir da frequência gerada por um cristal oscilador - mantém a contagem do tempo a partir de um horário definido e salvo em sua memória interna.

Este horário é definido com auxílio de um protocolo nomeado I2C, com propósito de realizar a comunicação entre o microprocessador utilizado e o RTC.

O RTC trabalha em conjunto com o processador em um sistema de *requests*, ou seja, quando solicitado pelo processador via protocolo I2C, o RTC responde com a hora e data no instante. O RTC também apresenta a função de gerador de interrupções, que é na prática uma função de alarme, que em horário definido gera uma tensão no pino reservado a esta função no RTC.

Assim como vários circuitos integrados, um RTC tem um circuito padrão com componentes padrões para garantir seu bom funcionamento, geralmente definidos nos *Application Notes* encontrados na sua ficha técnica (*Datasheet*) representando quais ligações devem ser feitas e quais componentes devem compor o circuito. Segue o modelo do circuito do projeto e uma foto do componente real.

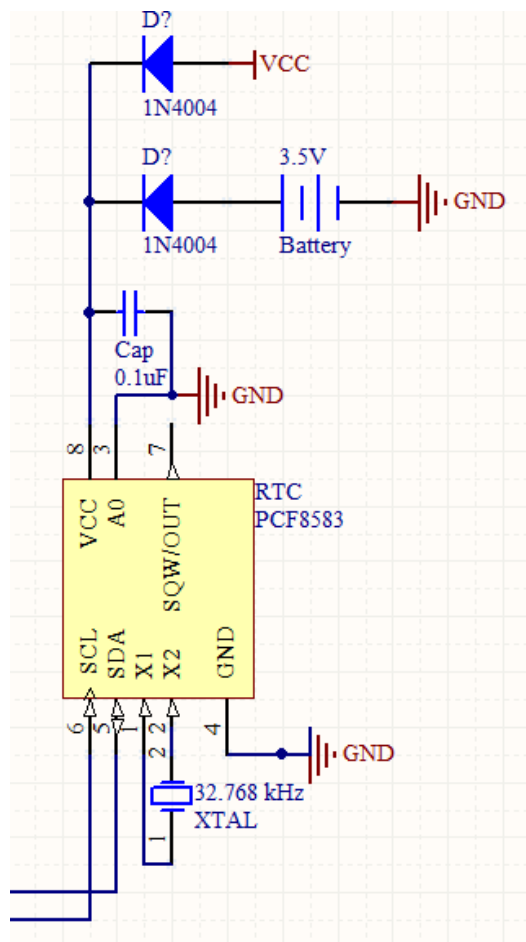


Figura 3.7 - Modelo de Circuito para um RTC e foto de um RTC (PCF8583)

Pode se notar a presença no pino 8 de uma bateria. Esta garante que na eventual queda da energia de rede, o RTC não perca a contagem do tempo, e mantenha seu relógio interno ajustado por um período superior a 6 anos sem fornecimento externo de energia. Durante a operação, com energia proveniente da bateria, o RTC não permite a gravação de uma nova data e nem a alteração dos horários do alarme programado.

O RTC será requisitado toda vez que o compressor for ligado ou desligado. Ao microprocessador receber o sinal do sensor que indica o status do compressor, o microprocessador pede para o RTC indicar que horas isso aconteceu..

O RTC será requisitado durante a tomada de decisões que culmina no acionamento do compressor para que este desligue precisamente antes do início do horário de pico, fornecendo ao processador o horário local.

Deve ser implementada também um protocolo no microprocessador que compare a data recebida pelo RTC com as datas padrão do início e término do horário de verão, permitindo correção do horário fornecido pelo RTC.

3.3.3 Como realizar a comunicação entre computador e microprocessador

Dado que o projeto necessita analisar os dados que o microprocessador está recebendo dos demais circuitos para validar os resultados do projeto, torna-se necessária a instalação de componentes que possibilitem a comunicação entre o computador e o microprocessador, chamados de *driver/receiver*, para monitoramento das variáveis do projeto.

O projeto decidiu optar pela utilização de um circuito integrado MAX232N que faz a comunicação entre uma porta serial, padrão RS-232 encontrada em computadores, e dois pinos do processador dedicados a esta comunicação, um para o envio e um para o recebimento de dados.

Foi utilizada uma configuração minimalista, utilizando apenas três pinos em um conector DB9, encontrado nas portas serial de computadores: um para envio de dados, um para recebimento e o pino que vai para o terra da fonte de alimentação.

Assim como os RTCs, esses circuitos integrados também necessitam de outros componentes que o próprio fabricante define nas suas fichas técnicas e nas notas de aplicação.

Como melhorias ao circuito básico, foram adicionados dois LED's para monitoramento do envio e recebimento dos sinais, um montado em lógica normal e outro montado em lógica inversa, ou seja, um se mantém ligado e desliga quando há tráfego de sinais em uma direção, e o outro se mantém desligado e acende quando há tráfego na direção oposta.

Segue o diagrama do circuito utilizado no projeto e uma foto do componente real:

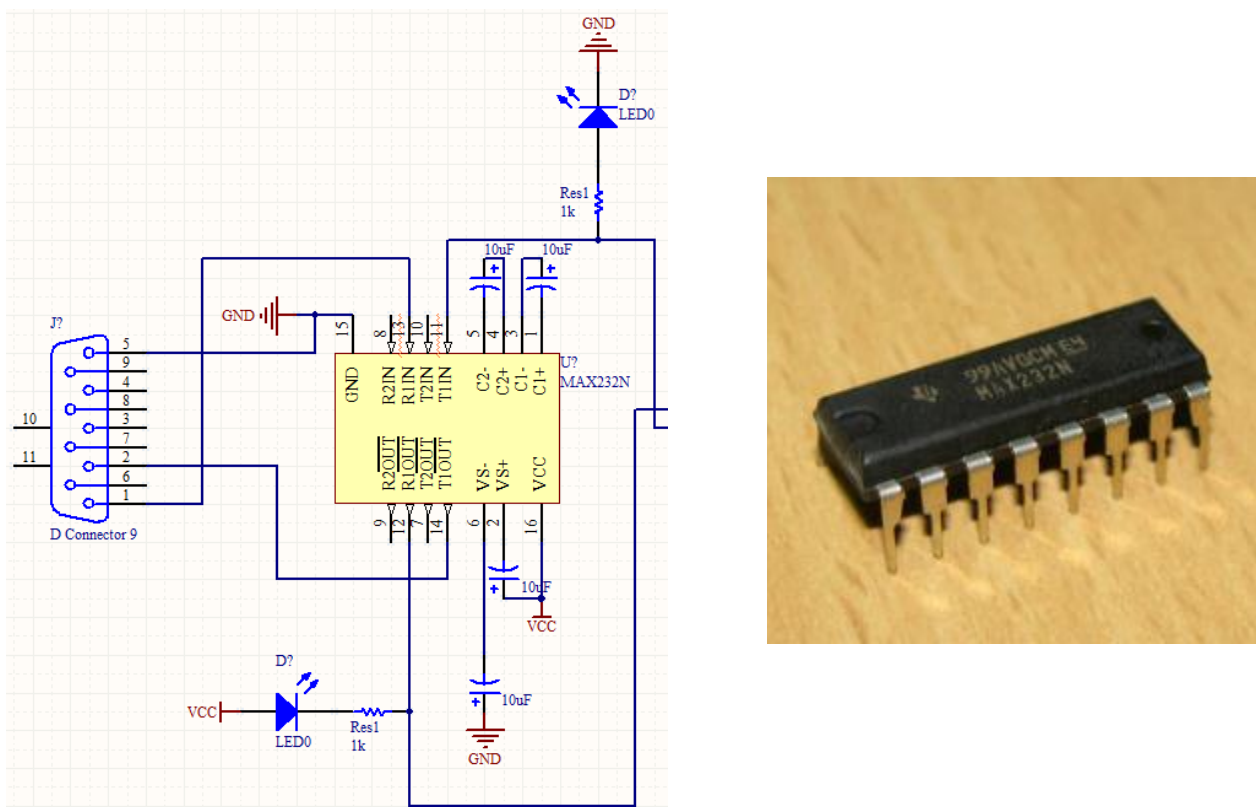


Figura 3.8 - Modelo de Circuito utilizado e foto do componente utilizado MAX232N

Além do circuito mostrado foi utilizado outro acessório, um conversor Serial/USB comercial a fim de expandir a gama de computadores passíveis de serem utilizado para desenvolvimento do projeto, visto que nos computadores e notebooks disponíveis para desenvolvimento não se encontravam portas serial.

Segue abaixo foto do adaptador utilizado:



Figura 3.9 – Cabo conversor USB/Serial utilizado

3.3.4 Como o equipamento irá acionar e desligar o compressor

A estratégia adotada pelo projeto para acionar o compressor através do circuito integrado foi a de utilizar um relé e um circuito transistorizado.

Um relé é um componente que atua como um interruptor acionado por uma bobina. Esta bobina deve ser energizada pelo sinal de controle e assim fechar o circuito entre os terminais do relé, quando este está montado em uma configuração de normalmente aberto, ou NA.

Quando decide-se acionar o compressor, o microprocessador muda o estado de um de seus pinos de forma em que haja tensão entre este e o terra. O sinal gerado pelo conjunto tensão/corrente disponibilizado no pino do microprocessador é insuficiente para acionar a bobina do relé.

Para contornar tal problema foi adotado o uso de um transistor. Este componente, ao receber um sinal entre seu pino de base e o emissor, controla uma corrente muito maior entre o pino emissor e o coletor, atuando analogamente à uma válvula de corrente.

Utilizando o sinal do microprocessador para estimular o pino base do transistor, conseguimos controlar um sinal de maior potência entre os outros dois terminais do transistor de modo a poder ligar e desligar a bobina do relé ligando ou desligando assim a carga controlada, no caso, o compressor.

Segue o modelo do circuito utilizado no projeto.

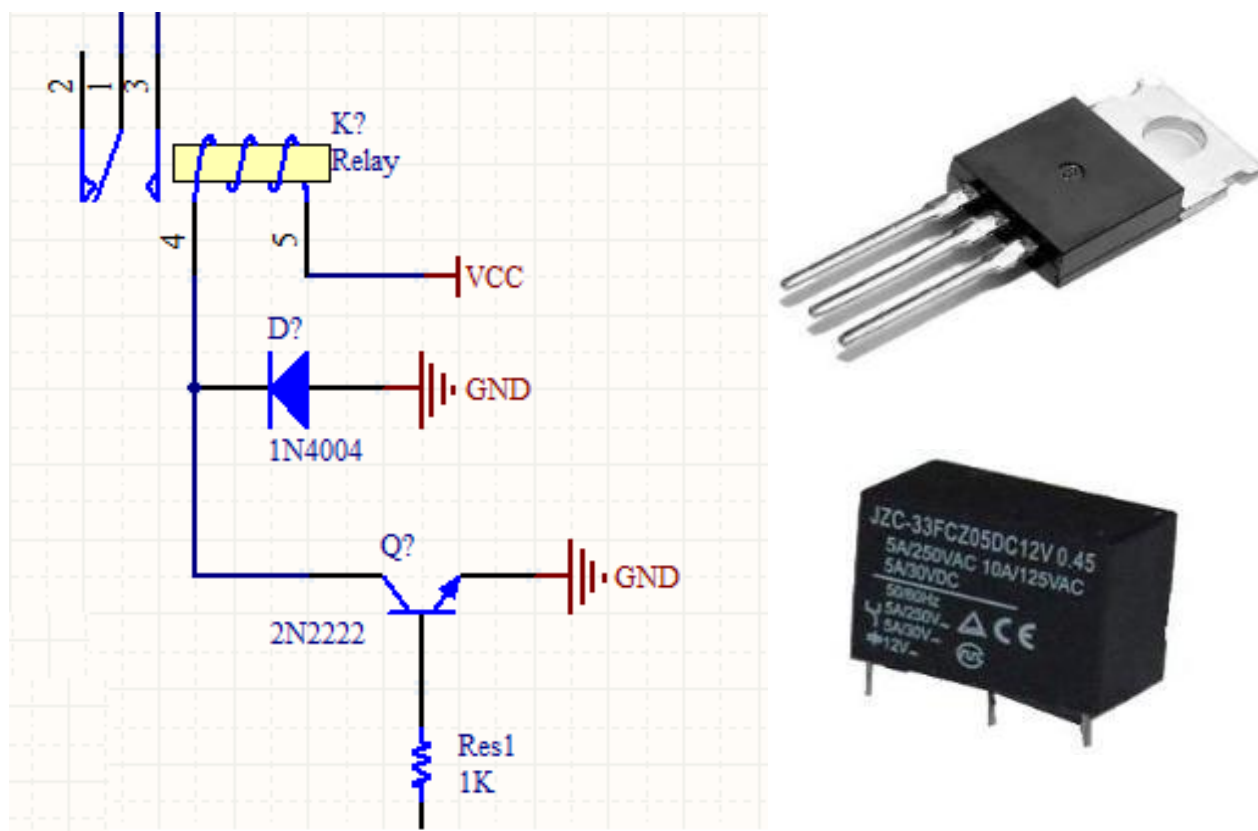


Figura 3.10 - Modelo de Circuito com transistor (canto superior direito) e relé(canto inferior direito)

3.3.5 Microprocessador e plataforma de desenvolvimento

Até o presente momento foram apresentados os componentes chave que compõe cada subconjunto da montagem.

Para controlar todo o conjunto escolhido, de forma a seguir o protocolo desenvolvido para o controle do equipamento e sua forma de funcionamento, precisamos de um componente centralizador que seja capaz de armazenar um programa e gerenciar os inputs e outputs gerados ou demandados pelos subconjuntos anteriores.

O componente que atende a esta demanda é denominado microprocessador. O mesmo é um circuito integrado que possui várias portas lógicas que podem ser gerenciadas de forma a receber sinais analógicos ou digitais, processá-los de acordo com um programa armazenado em sua memória e em função dos sinais de entrada gerar sinais de saída adequados.

Existem várias famílias de microcontroladores cada uma com suas vantagens e desvantagens. Em nosso caso, de desenvolvimento de um protótipo do equipamento, necessitamos de uma plataforma bem flexível, que permita a mudança do arranjo dos conjuntos facilmente, e tenha espaço para eventuais mudanças e condições de testes e ensaios.

Atributos essenciais para isto são o custo, disponibilidade no mercado, flexibilidade e principalmente a existência de uma plataforma de desenvolvimento amigável, para que se grave e altere com facilidade o programa gravado na memória, e que nesta plataforma exista uma quantidade de informação e bibliotecas de funções suficientes para que se possam utilizar quaisquer circuitos integradas sem haver a necessidade de se escrever funções específicas para operações básicas.

Como elemento central foi escolhido um microprocessador Atmega8, que além de ser facilmente encontrado no mercado é compatível com a plataforma de desenvolvimento *opensource* chamada de Arduino, na qual encontram-se uma gama extensa de bibliotecas e funções para diversas aplicações. Tal fato dá-se na existência de uma legião de hobbystas e profissionais adepta ao uso de tal plataforma.



Figura 3.11 – Microprocessador ATMEGA8

Além disso, foi escolhida a configuração denominada *Minimal* para o uso do microprocessador, que consiste no uso do circuito mais simples para correto funcionamento do processador, sem uso de fonte de clock externa entre outros.

Nesta configuração encontramos somente um botão de reset, utilizado para entrar no modo *bootloader*, onde o microprocessador pode ser programado, juntamente com um resistor de *pull-up*; a alimentação do circuito, com uso de capacitores como filtro e um led indicativo do status do processador;

Com os componentes acima e os circuitos mostrados nas subseções anteriores, um protótipo do circuito utilizado nos testes já pode ser montado.

Na seção seguinte será apresentado a montagem em *protoboard*, placa em que são conectados todos os componentes, e quais componentes foram utilizados na montagem do protótipo.

3.3.6 Montagem final em *Protoboard* e componentes utilizados

Com todos os circuitos integrados já modelados o projeto já pode ter um modelo final incluindo o microprocessador.

O modelo foi primeiramente realizado em um *software* chamado Altium. A ferramenta é bastante simples e já contém várias bibliotecas com as configurações padrões que diversos componentes devem ter para manter seu bom funcionamento.

Para o projeto os componentes utilizados são listados na tabela abaixo.

Tabela 3.1 – Relação dos componentes utilizados no modelo final

Componente	Modelo	Quantidade	Unidade	Preço Médio Unitário* (R\$)
Protoboard	Minipa 830	1	-	19
Fonte 220-5V	-	1	-	12
Microprocessador	Atmega8A	1	-	20
RTC	PCF8583	1	-	7
Driver/Receiver	MAX232N	1	-	10
Capacitor Cerâmico	-	3	0.1 μ F	0.15
Capacitor Eletrolítico	-	4	1 μ F	0.20
Capacitor Eletrolítico	-	1	10 μ F	1
Resistor	-	1	220 Ω	0.10
Resistor	-	1	470 Ω	0.10
Resistor	-	3	1K Ω	0.10
Resistor	-	4	10K Ω	0.10
Diodo	1N4004	2	-	0.15
Botão	SW-PW	3	-	0.15
Sensor Efeito Hall	S41	1	-	5

Cristal	-	1	32.768kHz	1.5
Bateria	-	1	3V	2
Relé	-	1	5V – 220VAC(3A)	2
LED	-	3	5mm (3.5V)	0.4

* Valores médios encontrados no site www.mercadolivre.com.br. Alguns itens só são vendidos em lotes.

Para a montagem na protoboard, o projeto gastou aproximadamente R\$ 84. Certamente este valor não reflete o custo real de um equipamento montado em escala e com uso de componentes dedicados e otimizados para tal função, como o uso de um microprocessador mais simples e que receba sua programação em série.

Em uma suposta versão comercial também não seria necessária a parte do circuito referente à comunicação via serial, visto que esta é usada somente para fins de desenvolvimento.

Segue uma imagem do modelo na ferramenta altium que serviu como base para a validação dos testes de *software* e de todos os componentes exceto o sensor para identificar o acionamento do compressor, tendo como substituto um botão de acionamento manual.

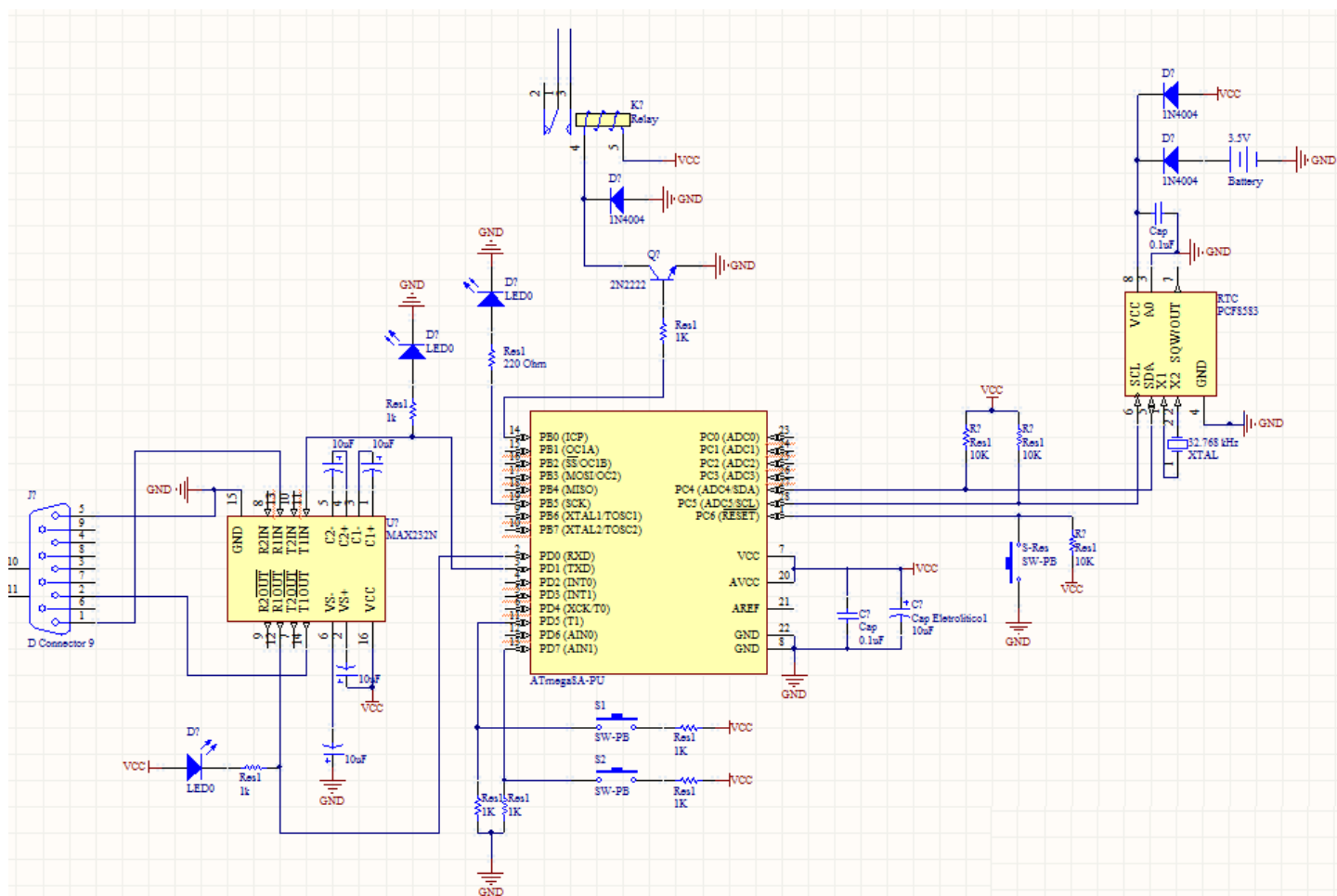


Figura 3.12 - Modelo dos circuitos que serviram como base para a montagem do protótipo e testes iniciais

Com o esquema de como deverão ser posicionados os componentes na *protoboard* o projeto deu seguimento a confecção do circuito utilizado nos teste. Segue a imagem do protótipo montado para os testes do projeto.

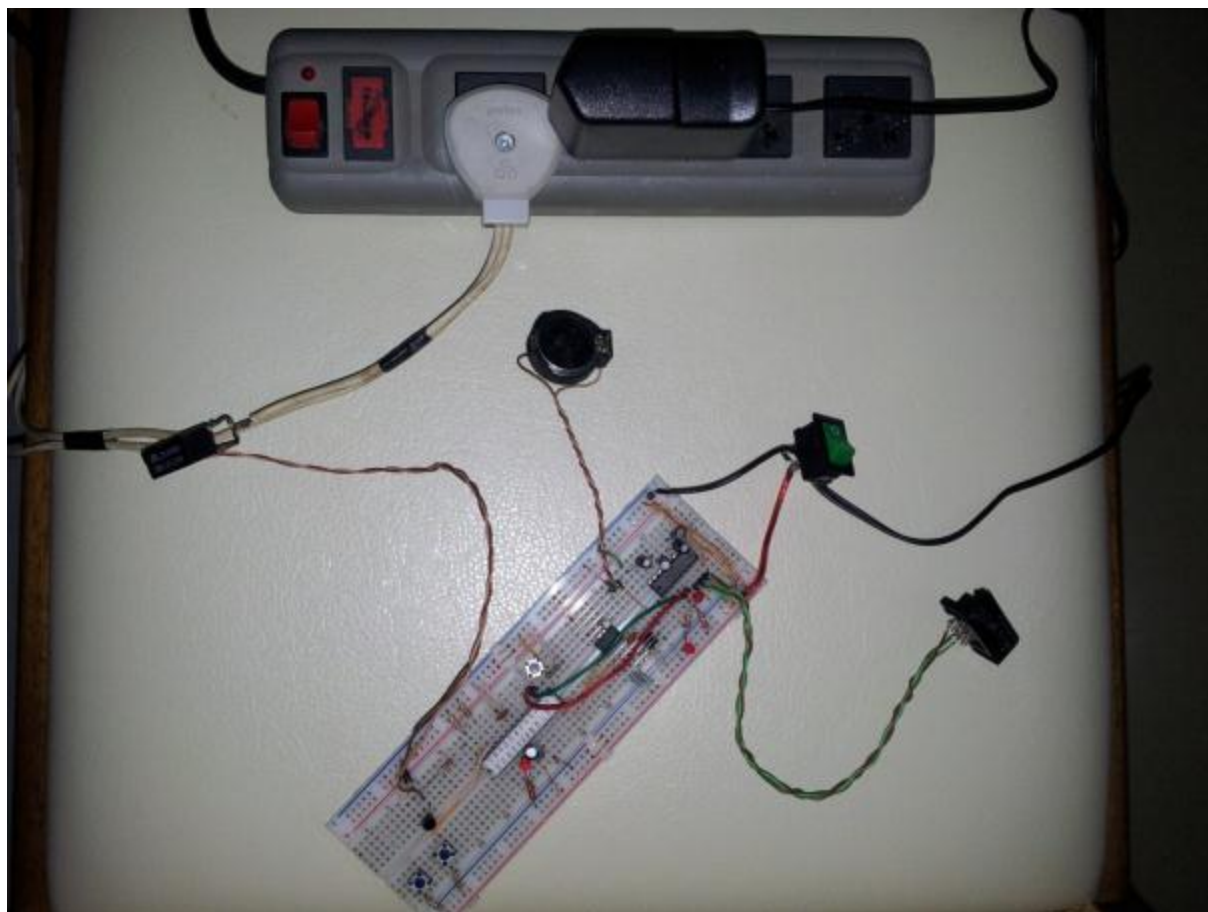


Figura 3.13 – Protoboard com os componentes utilizados nos testes

Um ponto importante a ser notado é que o projeto optou por adicionar LEDs em diferentes posições para auxiliar na identificação de erros. O projeto optou por LEDs que identificam:

- Acusar se a porta serial está enviando e/ou recebendo dados.
- Acusar se o equipamento está ligado
- Acusar se o microprocessador está enviando/recebendo dados
- Acusar modo de aprendizado

Em geral o uso dos LEDs sempre ajuda pois em códigos extensos o seu uso pode direcionar aonde o erro pode ter ocorrido poupando tempo na hora de solucionar o problema.

3.4 SOFTWARE

O projeto utilizou a plataforma Arduino no desenvolvimento dos algoritmos que programaram o microprocessador. Arduino é uma plataforma *open-source* para projetos utilizando microcontroladores.

O projeto decidiu por esta plataforma pela mesma dispor de um grande número de bibliotecas e fóruns na internet com vários exemplos de projetos similares, tanto na montagem do *hardware* quanto na lógica computacional embarcada.

A linguagem de programação utilizada pelo software é baseada em C.

Para o projeto, o código computacional que será embarcado no microprocessador deverá ser capaz de entender e comandar os quatro principais itens que definiram a arquitetura do hardware e também os dois modos de funcionamento do equipamento abordados no início do capítulo.

Os modos de funcionamento englobam as quatro partes da estratégia do projeto para resolver o problema.

No modo de aprendizado, os componentes chave utilizados são:

- Sensor de compressor acionado
- RTC
- Microprocessador
- Porta Serial

Neste modo estão englobados os subtópicos 3.3.1 até 3.3.3. Vale ressaltar que a Porta serial só faz parte deste modo na fase de testes do projeto para validação dos resultados. Afinal é através dela que o projeto irá recolher as informações salvas no microprocessador e avaliar a relevância dos dados.

Já no modo normal, os componentes utilizados são:

- Relé
- RTC
- Microprocessador
- Sensor de compressor acionado

Neste modo também é englobado o subtópico 3.3.4. Mas o mesmo depende das informações obtidas no modo anterior. Este modo apesar de parecer mais simples é a parte que controlará o acionamento forçado do compressor em um horário fora do pico de demanda.

Para os dois modos o controle do RTC é baseado em uma biblioteca específica que determina quais comandos devem ser utilizados para obter o horário e data do RTC. A lógica envolvida nestes modos já foram explicadas e ilustradas no início deste capítulo, figuras 3.2 à 3.4, o código estará na parte de anexos do relatório. Os comandos específicos e bibliotecas utilizadas estão comentados no código.

4. TESTES, SIMULAÇÕES E ANÁLISES

Desenvolvido o equipamento proposto, o projeto seguiu uma linha de trabalho para validar os resultados baseada em alguns testes e simulações. A estratégia é testar, primeiramente, se cada componente principal (sensor de compressor acionado, microprocessador, RTC, porta serial e relé) está não só funcionando como realizando o papel desejado pelo projeto. O projeto definiu, portanto, como testes e simulação os seguintes itens:

- Teste do Microprocessador, RTC e Porta Serial. Neste será testada a funcionalidade da porta serial em programar o chip do microprocessador e visualizar a hora gerada pelo RTC também através da porta serial. O RTC deve receber uma informação contendo a hora programada e mantê-la mesmo com a fonte desligada.
- Teste do Relé. Neste será testada a capacidade do relé escolhido acionar uma carga na classe de potência do compressor da geladeira.
- Teste de componentes que consigam sentir o campo magnético na carcaça do compressor, identificado o acionamento do mesmo. Neste etapa o projeto testou dois componentes: *Reed Switch* e Sensor de Efeito Hall.
- Teste de validação do protótipo. A ser realizado conforme funcionamento descrito do equipamento, mas usando uma carga elétrica que não o compressor para ser acionada. Tal motivo é justificável, pois visa-se preservar o equipamento testado. Pois, apesar de funcional, o circuito não apresenta dispositivos de proteção que seriam utilizados na versão comercial do equipamento.

4.1 TESTE DO MICROPROCESSADOR, RTC E PORTA SERIAL

O objetivo principal deste teste é verificar se o microprocessador, o conversor serial, o RTC e o conversor usb-serial estão funcionando. O código utilizado como teste é bastante simples mas suficiente para detectar se há falhas ou não nos compontes.

O código de teste tem como função solicitar ao RTC informar a hora correta armazenada a cada 3 segundos. Basicamente o microprocessador envia um sinal para o RTC pedindo que o mesmo retorne a hora marcada por ele. Como o RTC não vem nem com horário nem data de fábrica, o código também permite adicionar a data e hora inicial deste componente via porta serial. A visualização da hora e data enviadas pelo RTC é, também, feita através da porta serial e pode ser visualizada no computador. Segue o resultado gerado pelo algoritmo, que também constará no anexo do relatório.

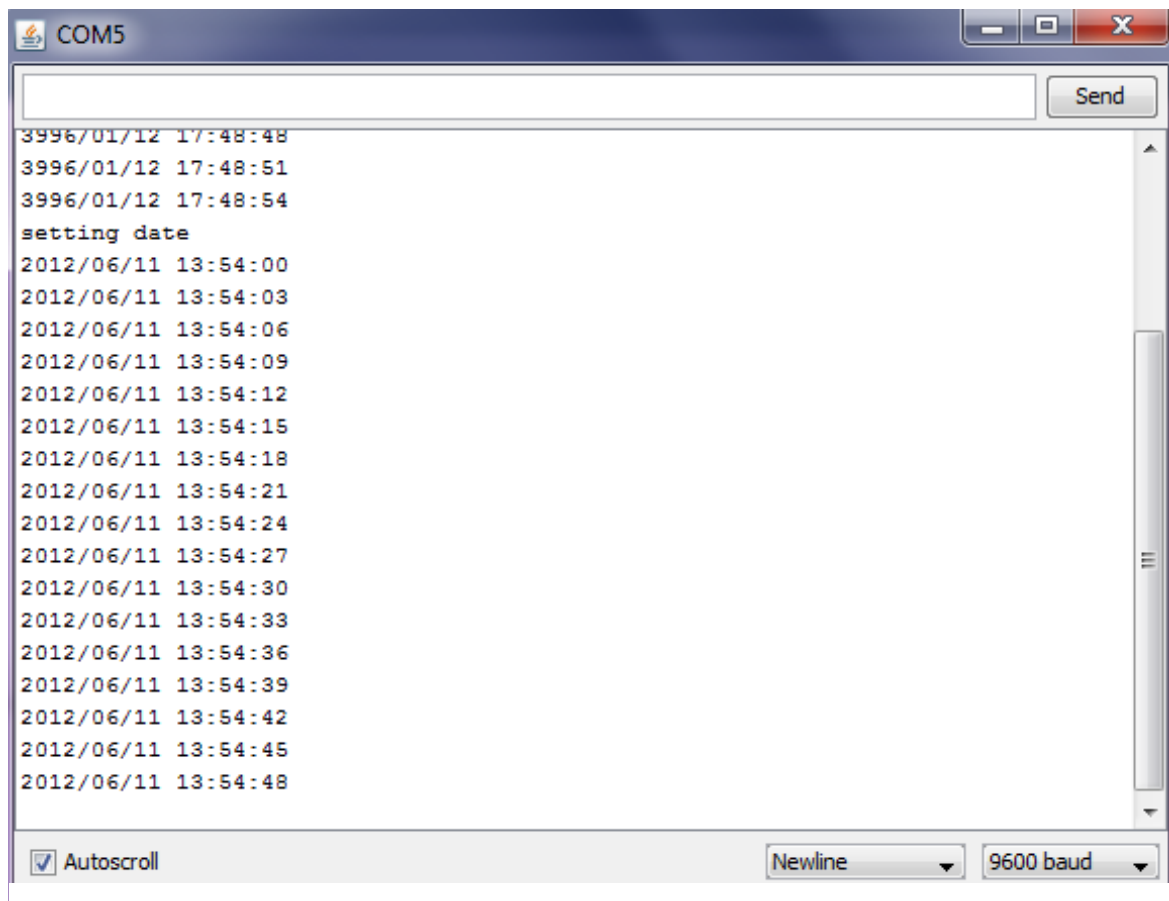


Figura 4.1 – Mensagem enviada pelo microprocessador no teste do RTC

Podemos observar que o circuito montado para o RTC funcionou corretamente pois a informação da data e hora chega ao microprocessador sem erro.

Um erro que pode acontecer caso o circuito não esteja bem montado é de o RTC enviar a hora com referências diferentes ou valores nulos caso o pino de endereçamento do RTC não esteja conectado, ou esteja ligado a referência errada.

Outro parâmetro testado é o de simular uma queda de energia, simplesmente desligando o interruptor que mantém a fonte do equipamento ligada à rede. Mesmo quando isso acontece o RTC, graças a sua bateria dedicada, não perde a marcação da hora e o projeto não corre o risco de se basear em horários incorretos.

Dado que o código rodou sem erros, pode-se afirmar que todos os componentes testados funcionam perfeitamente pois se a informação chegou ao computador é sinal de que a porta serial funcionou na hora de transmitir e receber informações, que o microprocessador funcionou, pois soube acionar os demais componentes, e que o rtc também funcionou, pois enviou com exatidão a data e hora.

4.2 TESTE DO RELÉ

O segundo teste realizado no projeto foi para validar o circuito que aciona o relé. Mais uma vez um código simples foi utilizado para avaliar o componente. Para este código, a cada vez que um botão instalado na *protoboard* for pressionado o microprocessador deve acionar o relé.

Para auxiliar no diagnóstico do teste, o microprocessador envia uma mensagem à porta serial dizendo que o botão foi pressionado, indicando que a sequência de atividades necessárias para o acionamento do relé foi iniciada. Quando o relé é acionado, o mesmo gera um ruído característico, como um estalo.

O algoritmo utilizado neste teste está em anexo. Segue uma imagem com a mensagem recebida pela *protoboard*, indicando que o código está realizando a atividade imposta juntamente com a montagem do circuito:

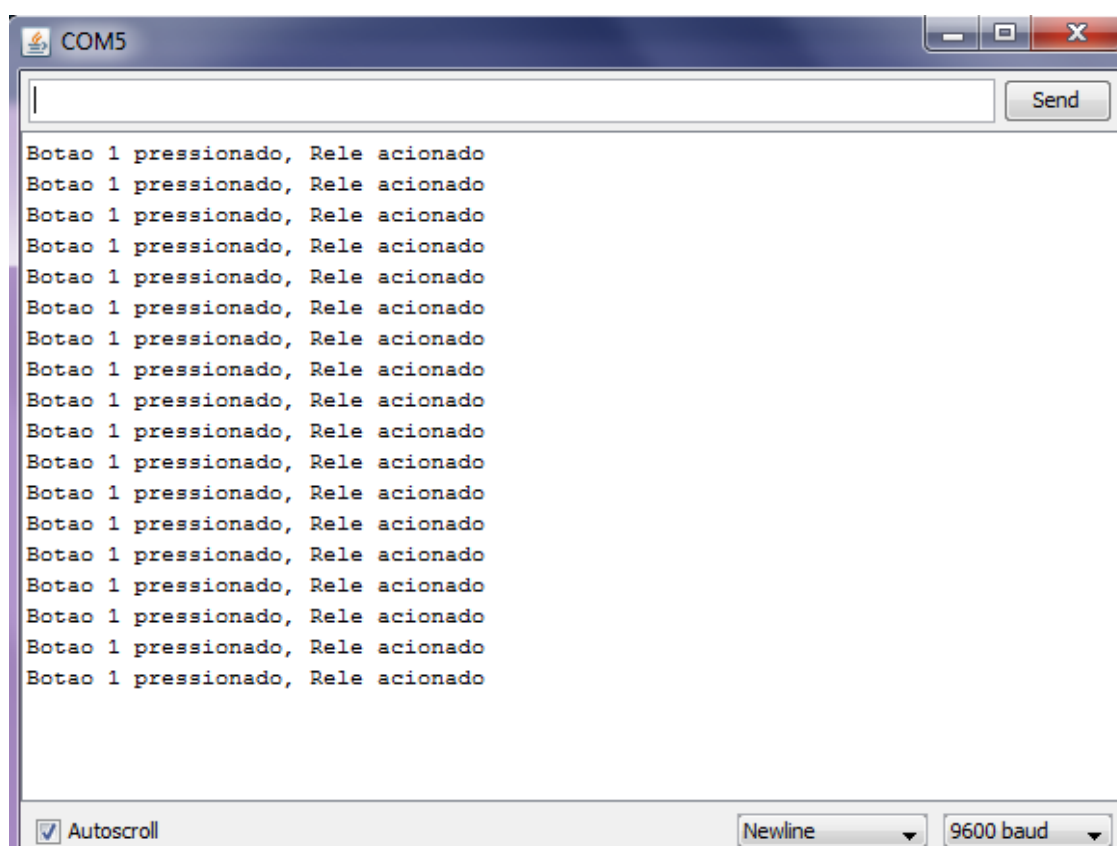


Figura 4.2 – Mensagem enviada pelo microprocessador no teste do Relé

Dado que o código não teve nenhum erro na sua execução e que as mensagens recebidas pela porta serial são compatíveis com o proposto no código e que o relé foi capaz de acionar a carga proposta, no caso da montagem uma lâmpada de 100W, potência próxima a encontrada nos compressores de refrigeradores domésticos, o componente está funcionando perfeitamente e pronto para os próximos testes.

4.3 TESTES PARA IDENTIFICAR O ACIONAMENTO DO COMPRESSOR

Como já dito no capítulo anterior, esta atividade foi a que o projeto enfrentou mais dificuldades.

Apesar do projeto ter pesquisado as melhores opções para resolver este problema, procurando quais equipamentos são usados na prática para soluções parecidas, algumas não tiveram um resultado satisfatório.

O primeiro teste foi feito com o *Reed Switch*. O componente, conforme explicado no capítulo 3, é bastante sensível e bem simples. Seria, na teoria, ideal para o projeto, pois atua como chave e sensor ao mesmo tempo, não requerindo amplificadores ou circuitos auxiliares mais complexos.

Primeiramente fez-se o teste para identificar o funcionamento do *Reed Switch* como chave. Utilizou-se um multímetro e verificou-se o fechamento dos contatos ao se aproximar do sensor um ímã de neodímio e como esperado houve o fechamento do contato. Ao se utilizar um ímã com um campo superficial menor (ímã de geladeira em folha) o contato não foi fechado, indicando um limiar de sensibilidade do sensor.

Entretanto, este sensor não conseguiu ser sensível o suficiente para, apenas em contato com a carcaça do compressor, sentir a presença de um campo magnético e portanto não fechava seu contato quando o compressor era acionado.

Os *reed switches* encontrados no mercado próximo não tinham a sensibilidade necessária para o projeto. Foi identificado que no mercado internacional existem *reed switches* com sensibilidade superior a sensores de efeito Hall.

Como o objetivo do projeto inclui não realizar uma instalação invasiva na geladeira - abrir a carcaça do compressor para instalar o sensor próximo das bobinas do compressor na tentativa de sentir o campo magnético - o projeto optou por uma segunda opção.

Desta vez o componente utilizado foi um sensor de Efeito Hall. Realizaram-se testes utilizando os mesmos ímãs do teste do *Reed Switch*, e ambos foram detectados pela montagem do sensor.

Mesmo assim, este componente não foi suficiente para sentir o campo magnético do compressor devido ao isolamento proporcionado pela sua carcaça.

Como o objetivo principal do projeto não é desenvolver uma solução específica para este problema, que pode ser contornado com a aquisição de componentes mais sensíveis ou o desenvolvimento de circuitos adicionais, foi decidido simular o efeito deste sensor através da utilização de um botão que, ao ser pressionado, fecha o circuito e excita o pino do microprocessador indicado em *software* como o sensor de compressor ligado.

Como o projeto necessita também da validação do software que deve ser embarcado no microprocessador, deu-se seguimento ao projeto com esta substituição. Segue uma ilustração do circuito e componente utilizados.

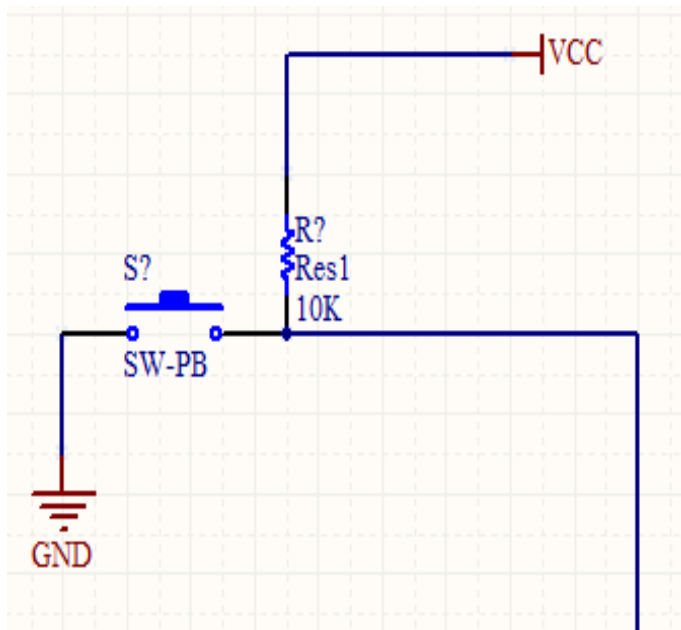


Figura 4.3 – Circuito preparado para a utilização de um botão e imagem deste componente

Os testes com o botão serão incluídos no próximo tópico, junto com todos os equipamentos ao mesmo tempo.

4.4 TESTE DE VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para validar os objetivos propostos no escopo do projeto, montou-se um circuito com configuração semelhante à do tópico 3.3.6. A diferença, como dito anteriormente, é que o sensor utilizado para identificar o acionamento do compressor foi substituído por um botão de acionamento manual que emula manualmente o comportamento do compressor acionado. Além disto, ao invés de acionar um refrigerador, acionou-se uma carga de 100W.

O acionamento de uma carga de 100W ao invés do refrigerador foi devido ao caráter experimental do projeto, sem circuitos de proteção para eventuais falhas ou erros de operação. Sendo assim, e pela falta de recursos para eventuais reparos, decidiu-se não testar o equipamento em um refrigerador.

Para que o equipamento acionasse o refrigerador, bastaria a montagem do relé em paralelo com os contatos do termostato, não requerendo nenhuma modificação extra no equipamento.

Na sequência, segue uma simulação dos modos de funcionamento com algumas modificações no algoritmo para que se fosse possível acompanhar os resultados e anexá-los ao relatório. Além disto, todos os testes foram testados com o contador do próprio microprocessador e também com o contador dedicado do RTC.

Os algoritmos utilizados nos testes estarão nos anexos do relatório. Para facilitar o entendimento deste teste, os modos de funcionamento serão apresentados em blocos. Isto facilita também na hora de desenvolver o algoritmo, pois desta forma os erros não se acumulam.

4.4.1 Modo de Aprendizado com contador do Microprocessador

Começando pelo modo de aprendizado com relógio do próprio microprocessador, a primeira etapa é checar se a porta serial está recebendo dados de acordo com o inserido no algoritmo. Primeiramente é verificado se o mesmo retorna algumas mensagens de texto, o tempo de aprendizado que o programa deve seguir e há quanto tempo o programa está funcionando. Segue a ilustração desta etapa.

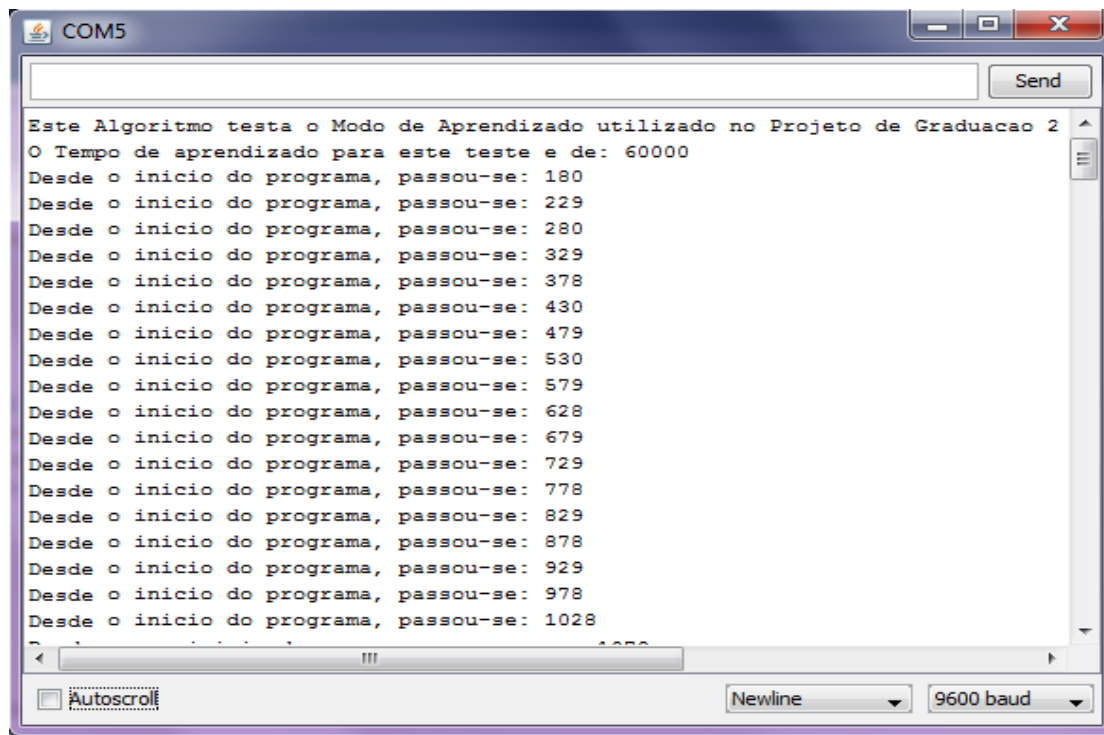


Figura 4.4 – Primeira fase do modo de Aprendizado.

Em seguida, o programa deve acusar quando o compressor for acionado, através do acionamento do botão. Além disso, quando perceber o acionamento do mesmo, deve indicar quanto tempo ele ficou desligado desde o último acionamento. E por fim, ao botão deixar de ser pressionado, também identificar que o compressor foi desligado. Segue a ilustração desta etapa:

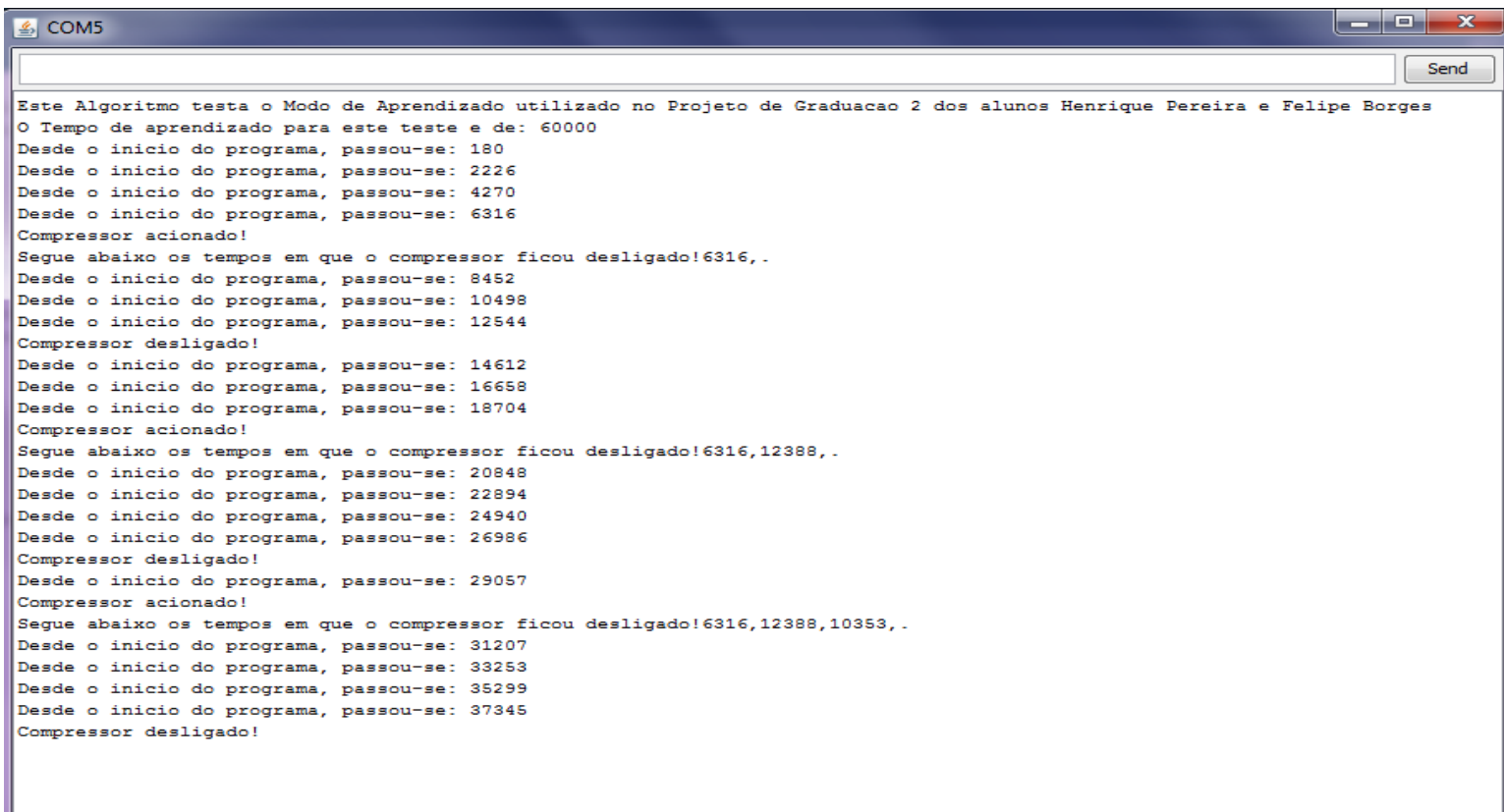


Figura 4.5 – Segunda fase do modo de aprendizado.

Agora que a identificação dos componentes já é percebida pelo protótipo, basta apenas acrescentar a rotina com os cálculos para as médias do tempo em que o compressor ficou ligado e desligado. Portanto, o próximo teste do modo de aprendizado deve exibir todos vetores e a média de tempo desligado e ligado, observada durante o período de aprendizado. Para simplificar, segue a parte referente a esta operação:

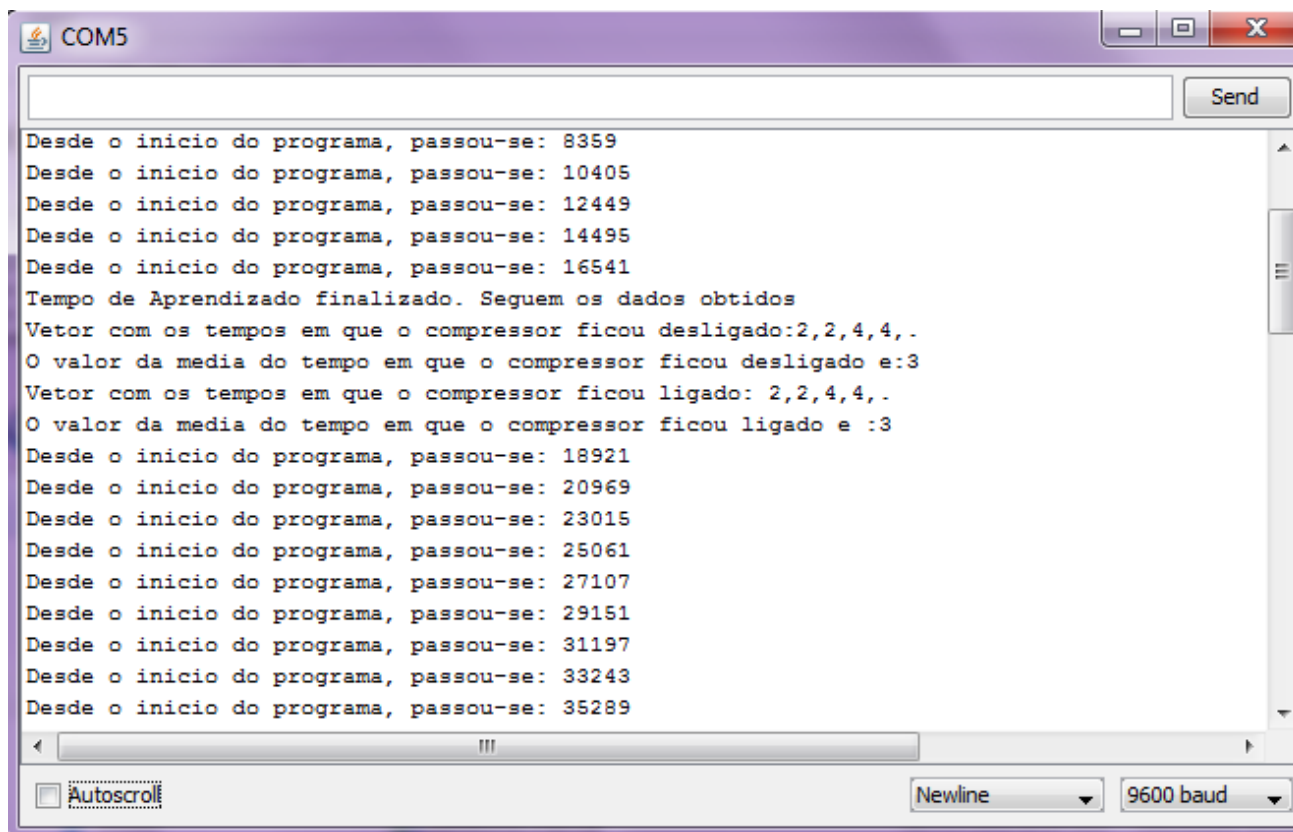


Figura 4.6 – Terceira fase do modo de aprendizado.

Dado que todos os componentes funcionaram corretamente a cada teste, enviando as informações que deviam enviar e realizar os cálculos de maneira correta, e com os valores da média em que o compressor ficou acionado e desligado, tudo está pronto para o início do Modo Normal do projeto. Entretanto o mesmo teste será feito com o relógio dedicado do RTC e somente em seguida os resultados do Modo Normal serão abordados.

4.4.2 Modo de Aprendizado com RTC

Este teste utiliza o contador exclusivo designado para o projeto. Assim como dito anteriormente, é importante o uso de um relógio dedicado, pois mesmo em caso de pico de energia ou problemas na rede o equipamento não perderá a referência da hora.

Este teste não apresenta tantas informações geradas pela porta serial pois sua biblioteca de funções utiliza um número bem maior de processamento. Mesmo assim, os resultados obtidos foram exatamente iguais aos resultados obtidos com o relógio do próprio microprocessador.

Segue a mensagem recebida via porta serial desta atividade:

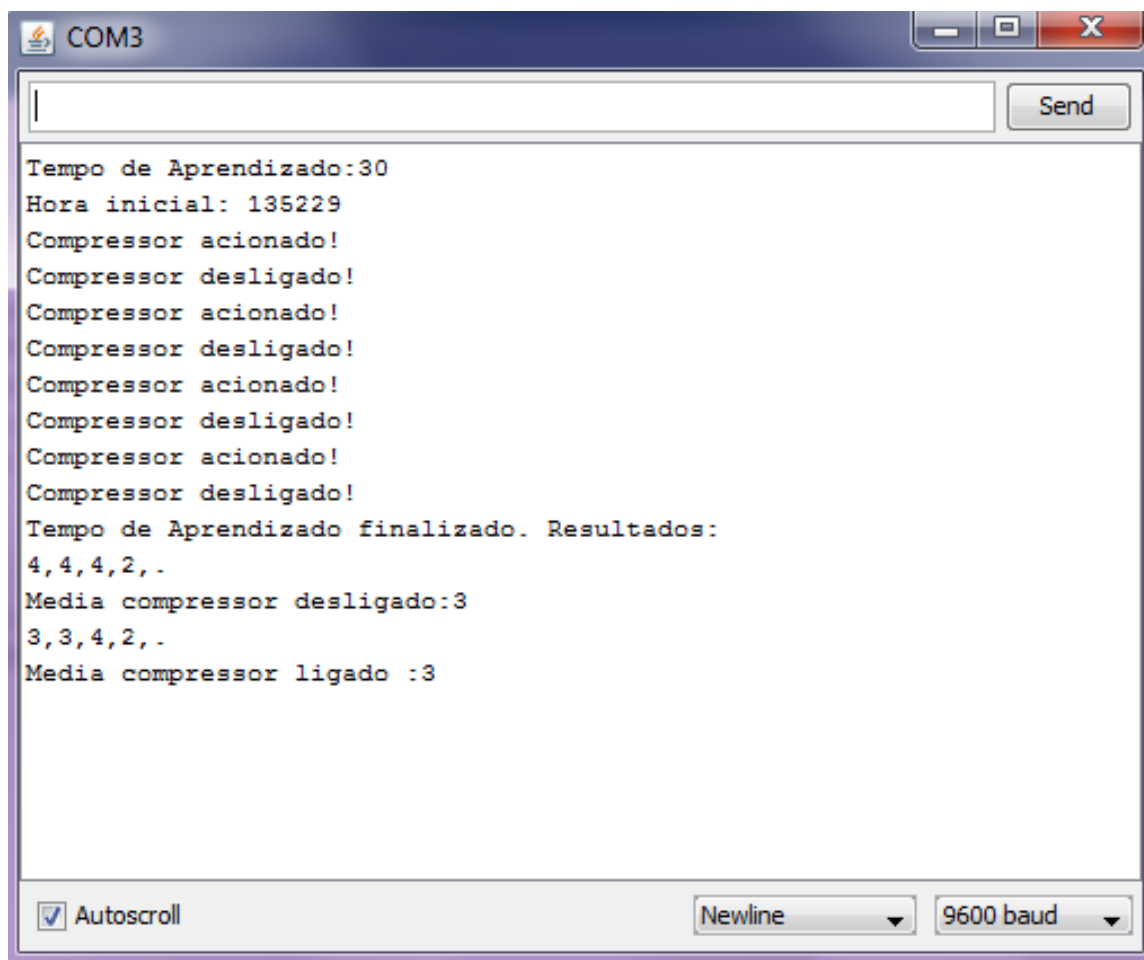
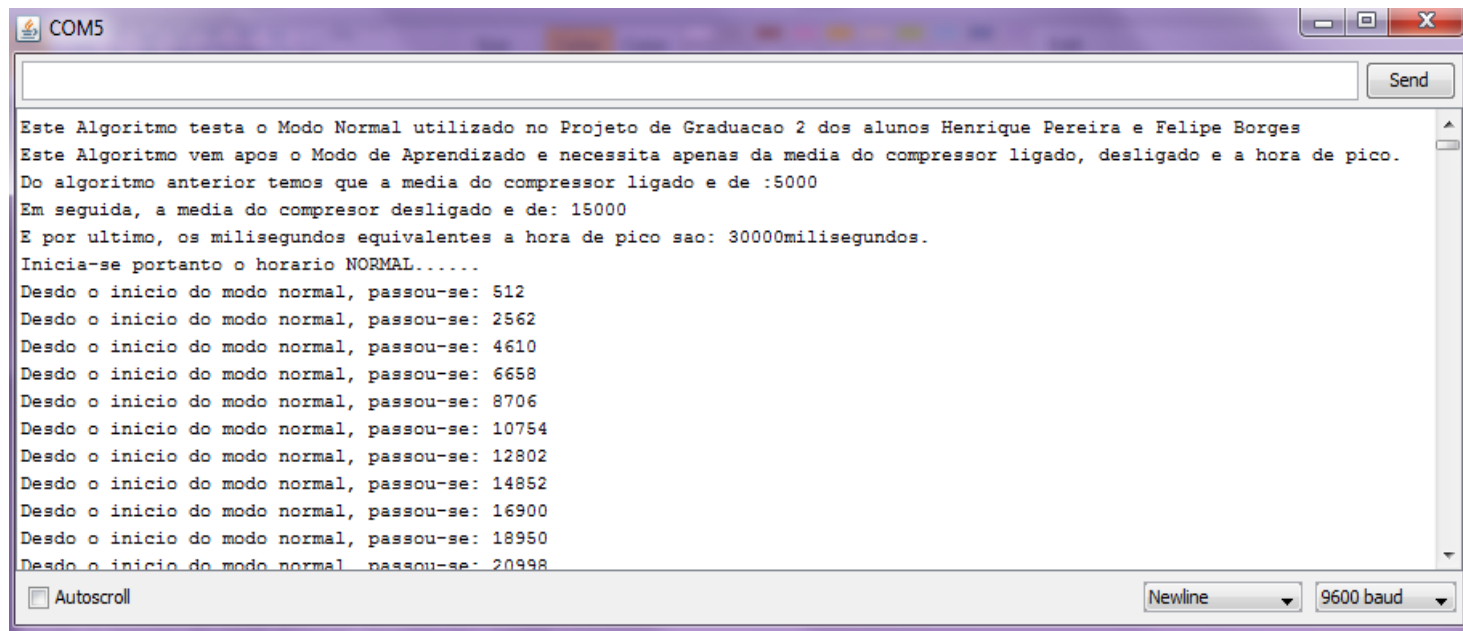


Figura 4.7 – Modo de Aprendizado com RTC.

4.4.3 Modo Normal com contador do Microprocessador

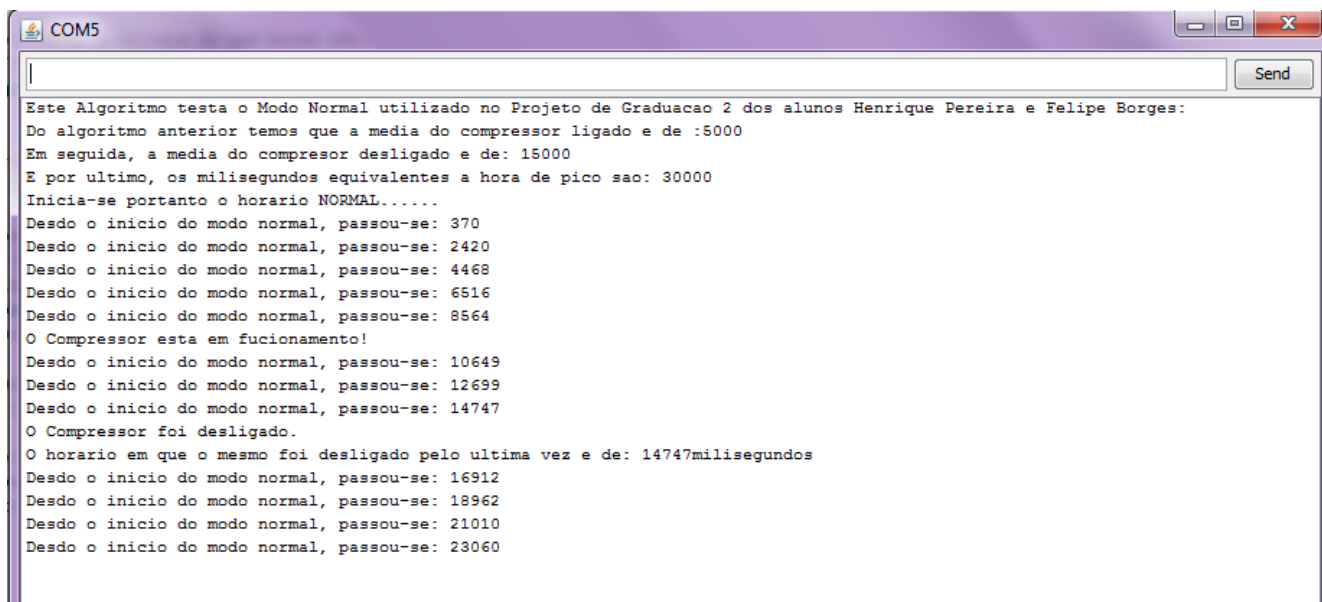
Assim como no tópico anterior, o algoritmo foi dividido em partes para que o projeto pudesse analisar passo a passo os resultados gerados pelo algoritmo. A primeira parte consiste em o algoritmo identificar os dados gerados pelo modo de aprendizado (tempo médio do compressor ligado, desligado e o horário de pico), e há quanto tempo o modo está funcionando. Segue a ilustração deste teste:



```
COM5
Este Algoritmo testa o Modo Normal utilizado no Projeto de Graduação 2 dos alunos Henrique Pereira e Felipe Borges
Este Algoritmo vem após o Modo de Aprendizado e necessita apenas da média do compressor ligado, desligado e a hora de pico.
Do algoritmo anterior temos que a média do compressor ligado é de :5000
Em seguida, a média do compressor desligado é de: 15000
E por último, os milissegundos equivalentes a hora de pico são: 30000milissegundos.
Inicia-se portanto o horário NORMAL.....
Desde o início do modo normal, passou-se: 512
Desde o início do modo normal, passou-se: 2562
Desde o início do modo normal, passou-se: 4610
Desde o início do modo normal, passou-se: 6658
Desde o início do modo normal, passou-se: 8706
Desde o início do modo normal, passou-se: 10754
Desde o início do modo normal, passou-se: 12802
Desde o início do modo normal, passou-se: 14852
Desde o início do modo normal, passou-se: 16900
Desde o início do modo normal, passou-se: 18950
Desde o início do modo normal, passou-se: 20998
Autoscroll Newline 9600 baud
```

Figura 4.8 – Primeira fase do Modo Normal.

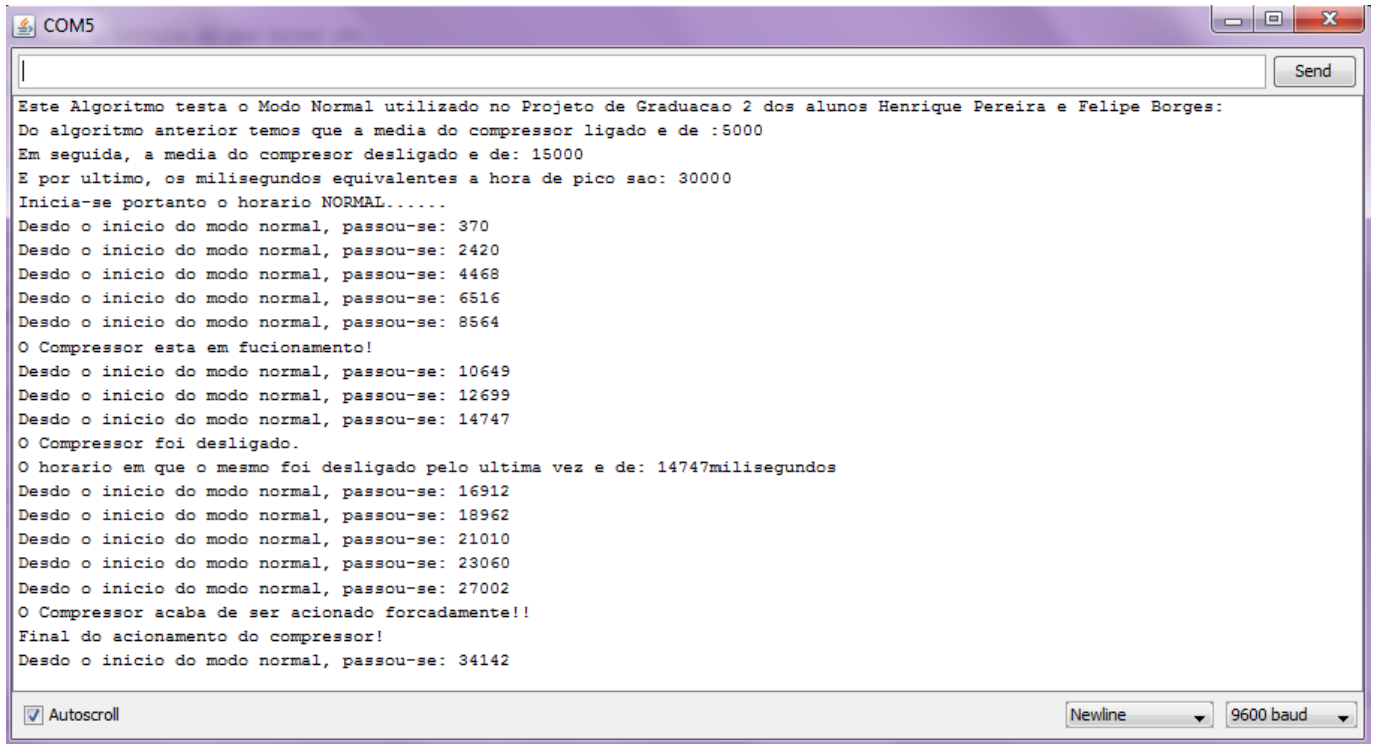
A segunda etapa do teste é verificar se o algoritmo identifica quando o compressor é acionado e se identifica o horário da última vez que ele foi desligado, para calcular quanto tempo falta para o próximo acionamento. Segue o resultado desta etapa:



```
COM5
Este Algoritmo testa o Modo Normal utilizado no Projeto de Graduação 2 dos alunos Henrique Pereira e Felipe Borges:
Do algoritmo anterior temos que a média do compressor ligado é de :5000
Em seguida, a média do compressor desligado é de: 15000
E por último, os milissegundos equivalentes a hora de pico são: 30000
Inicia-se portanto o horário NORMAL.....
Desde o início do modo normal, passou-se: 370
Desde o início do modo normal, passou-se: 2420
Desde o início do modo normal, passou-se: 4468
Desde o início do modo normal, passou-se: 6516
Desde o início do modo normal, passou-se: 8564
O Compressor está em funcionamento!
Desde o início do modo normal, passou-se: 10649
Desde o início do modo normal, passou-se: 12699
Desde o início do modo normal, passou-se: 14747
O Compressor foi desligado.
O horário em que o mesmo foi desligado pela última vez é de: 14747milissegundos
Desde o início do modo normal, passou-se: 16912
Desde o início do modo normal, passou-se: 18962
Desde o início do modo normal, passou-se: 21010
Desde o início do modo normal, passou-se: 23060
```

Figura 4.9 – Segunda fase do Modo Normal.

Por fim, a terceira fase deve ter também o acionamento forçado do compressor identificando o momento que ele foi acionado forçadamente e permanecendo neste estado durante o tempo médio de acionamento do compressor. Assim que o for definido o momento de acionamento do relé, a carga de 100W é acionada e a lâmpada é acesa. Segue o resultado desta etapa:



```
Este Algoritmo testa o Modo Normal utilizado no Projeto de Graduação 2 dos alunos Henrique Pereira e Felipe Borges:  
Do algoritmo anterior temos que a media do compressor ligado e de :5000  
Em seguida, a media do compresor desligado e de: 15000  
E por ultimo, os milisegundos equivalentes a hora de pico sao: 30000  
Inicia-se portanto o horario NORMAL.....  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 370  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 2420  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 4468  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 6516  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 8564  
O Compressor esta em fucionamento!  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 10649  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 12699  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 14747  
O Compressor foi desligado.  
O horario em que o mesmo foi desligado pelo ultima vez e de: 14747milisegundos  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 16912  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 18962  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 21010  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 23060  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 27002  
O Compressor acaba de ser acionado forcadamente!!  
Final do acionamento do compressor!  
Desdo o inicio do modo normal, passou-se: 34142
```

Figura 4.10 – Terceira fase do Modo Normal.

4.4.4 Modo Normal com RTC

Bem similar ao teste anterior porém com o contador exclusivo do RTC. Os motivos deste teste já foram explicados anteriormente.

A diferença, mais uma vez, para o subtópico anterior é que por ter uma necessidade de memória alocada maior, as mensagens geradas para o usuário são menores.

Mais uma vez os resultados obtidos foram exatamente iguais aos resultados obtidos com o relógio do próprio microprocessador.

Segue a mensagem recebida via porta serial desta atividade:

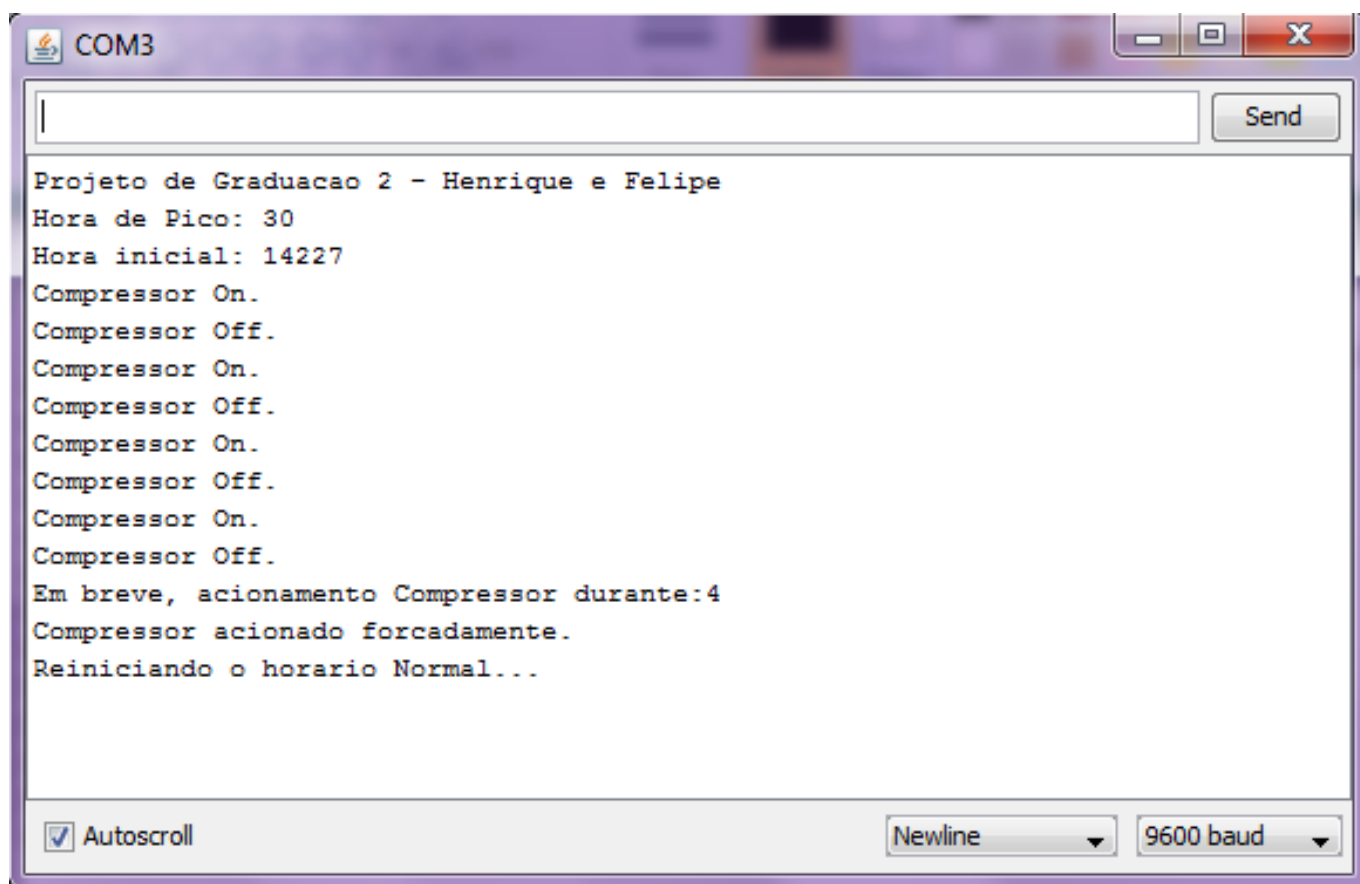


Figura 4.11 – Modo Normal com RTC

4.4.5 Modo Completo com contador do Microprocessador

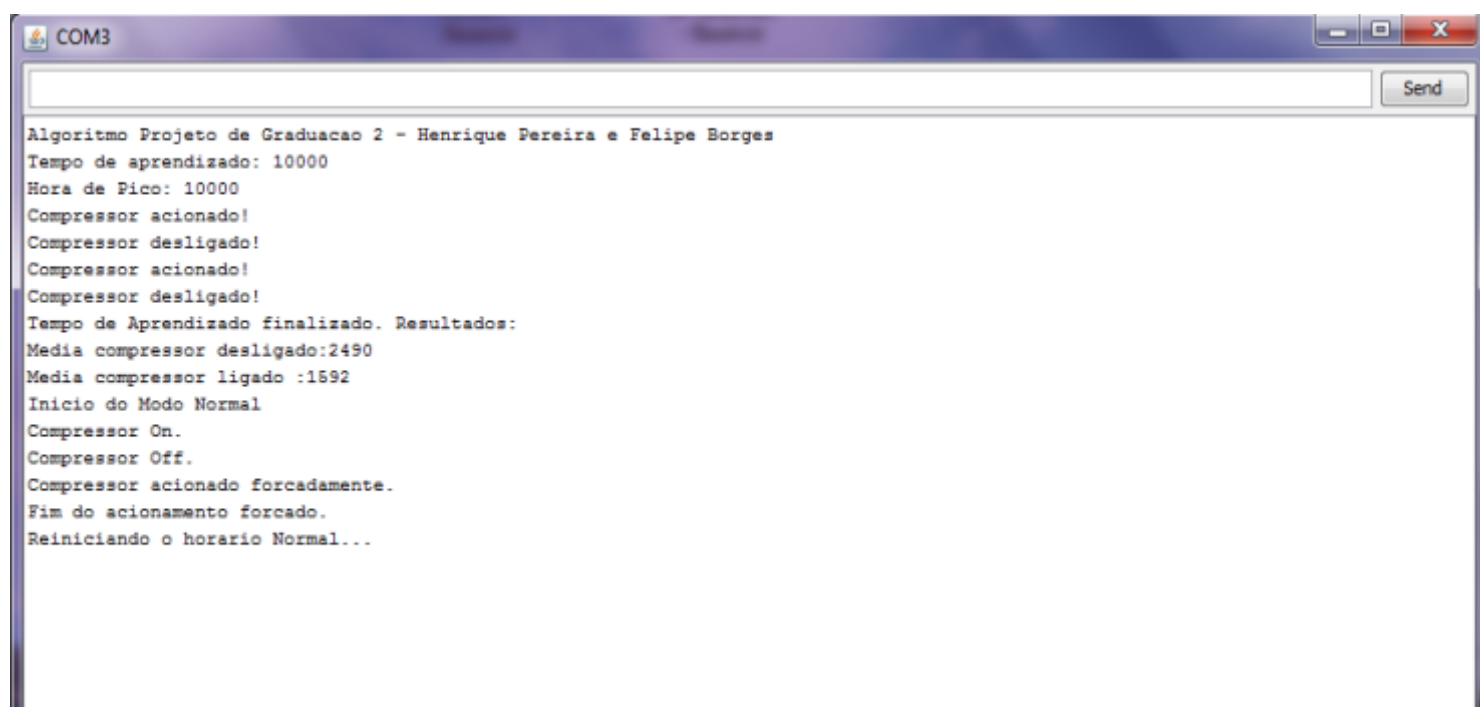
Todos os subtópicos anteriores tiveram apenas parte do código. Isto ocorreu pois, como a memória do microprocessador é limitada e cada mensagem enviada para o usuário consome uma quantidade considerável de memória, juntar os dois códigos ultrapassava a quantidade disponível de memória do AtMega8.

Porém é extremamente importante validar todos os modos em apenas um algoritmo. Afinal de contas, o equipamento final só pode ser embarcado com um algoritmo.

Afim de executar esta etapa, o projeto decidiu limitar bastante a quantidade de informações que o microprocessador envia ao usuário. De qualquer forma, todas as mensagens necessárias para verificar o bom funcionamento do equipamento já foram exibidas nos testes anteriores.

Por fim, uma modificação no algoritmo foi feita a fim de reduzir ao máximo o consumo de memória de cada passo do projeto. Nesta parte do projeto foi importante testar maneiras diferentes de obter os resultados tentando diminuir o número de variáveis do projeto assim como a maneira de declarar as informações do projeto, tempo de aprendizado, hora de pico, etc.

A mensagem reduzida obtida com este algoritmo foi a seguinte:



```
COM3
Algoritmo Projeto de Graduacao 2 - Henrique Pereira e Felipe Borges
Tempo de aprendizado: 10000
Hora de Pico: 10000
Compressor acionado!
Compressor desligado!
Compressor acionado!
Compressor desligado!
Tempo de Aprendizado finalizado. Resultados:
Media compressor desligado:2490
Media compressor ligado :1692
Inicio do Modo Normal
Compressor On.
Compressor Off.
Compressor acionado forcadamente.
Fim do acionamento forçado.
Reiniciando o horario Normal...
```

Figura 4.12 – Modelo completo do algoritmo.

As informações acima indicam que todos passos necessários para o bom funcionamento do projeto foram corretamente executados e este algoritmo está pronto para ser embarcado no equipamento final.

5.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS E CONCLUSÃO

5.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Chegou-se ao final do projeto com um protótipo que confirma e valida a lógica e a funcionalidade do dispositivo, todavia de uma forma mais conceitual do que próxima a um produto de mercado.

Para se trilhar o caminho da colocação do conceito como um produto no mercado deve-se primeiramente encontrar um sensor adequado para a tarefa de se verificar o status do compressor e na sequência realizar a portabilidade do *hardware* para componentes em padrão de produção, geralmente em *packaging* SMD, ou seja, de montagem na superfície da placa de circuito impresso.

Nesta versão não estaria presente a parte do circuito para comunicação via serial e encontraria-se apenas um botão – o de *reset* – para forçar o início de outro modo de aprendizado.

O processador escolhido para a versão produto deve ser adequado para tal, contendo apenas a quantidade de recursos necessários para a operação, que requer apenas a troca de informações com o RTC; a leitura do sinal do sensor; a leitura do status do botão de reset e o sinal para se acionar o relé.

Com esta versão enxuta pode-se partir para o desenvolvimento do traçado da PCB – *printed circuit board* – a ser fabricada em série.

Com a transformação em produto abre-se espaço também para a utilização de outras técnicas que não foram possíveis de serem implementadas neste desenvolvimento devido a problemas com custo ou tempo para implementação e testes.

A primeira delas seria eliminar a necessidade do modo de aprendizado, alocando uma área na memória do processador, que é limitada no utilizado no desenvolvimento, para que o equipamento mantenha dados sobre os n últimos ciclos de funcionamento do refrigerador, e a partir destes defina os parâmetros necessários para as tomadas de decisão.

A segunda seria a possibilidade de se usar como técnica de detecção de compressor ligado o uso de acelerômetros a fim de detectar a inerente vibração do compressor alternativo. Calibra-se o equipamento e utilizam-se de filtros a fim de evitar falsas leituras devida a perturbações do ambiente. Desta forma o equipamento se torna ainda menos invasivo e provavelmente mais confiável, devido a não existência de sensores fora do *packaging*, podendo assim ser o equipamento apenas preso ao refrigerador com o auxílio de pequenos ímãs que adeririam à carcaça do compressor.

Poderia também ser utilizada uma bobina de excitação em série com a alimentação do compressor que teria como função gerar o campo magnético a ser sentido pelo *reed switch* ou pelo sensor de efeito hall. Esta solução pode ser implementada de forma minimamente intrusiva e a custos baixos, mas está sujeita a perturbações oriundas da própria rede elétrica.

O projeto também abre espaço para a integração de outras tecnologias e processos que podem potencializar de forma incrível o resultado de uma possível instalação em massa nas residências do país.

Na sequência seguem algumas possibilidades bastante interessantes para tal:

- Adoção do sistema conjuntamente à um inversor de frequência.

Com esta configuração, além de permitir o acionamento forçado do compressor, pode-se controlar a velocidade de rotação do motor do compressor. Assim a capacidade de deslocamento da demanda de ponta é aliada com a redução do consumo energético do refrigerador, principalmente pela redução da histerese aquecimento/resfriamento.

Ao invés de se acionar o compressor em uma temperatura limite, mantém-se este operando em uma velocidade reduzida, a fim de se compensar apenas pela perda de calor.

Além desta opção este conjunto abre um leque amplo de possibilidades de controle e diferentes estratégias de operação para cada situação em que um refrigerador pode se encontrar: regime permanente, transiente após abertura da porta, partida da temperatura ambiente até a temperatura de trabalho, etc.

Equipamentos equipados com inversores de frequência estão no mercado há anos, e em países com fornecimento energético restrito – como o Japão – adotam na totalidade dos equipamentos este tipo de tecnologia.

Testes mostram que a diferença de consumo pode chegar a até 30% entre dois equipamentos novos, um equipado com o inversor e um não.

Como benefícios paralelos pode se incluir menor desperdício de alimentos devido a menor variação de temperatura interna no refrigerador.

- Adoção de sistema de comunicação com o operador do sistema.

Com a adoção do *smart grid* tornaria-se possível a comunicação entre o operador nacional do sistema elétrico e equipamentos individuais conectados à rede.

Implementando esta capacidade de troca de informações ao equipamento criaríamos um sistema que permitiria enorme manobrabilidade da rede elétrica nacional.

Um conjunto de mais de 40 milhões de equipamento, totalizando uma carga superior à 6 GW, totalmente controlável permite operar a carga de forma a compensar por diferenças na capacidade de geração de diferentes usinas em diferentes momentos, podendo até suprimir a necessidade do acionamento de algumas termoeletricas.

Enfim, esses são alguns avanços que podem ser realizados no equipamento para que seu potencial estenda-se além da capacidade de se deslocar parte da demanda de ponta dos refrigeradores.

Seguimos agora à conclusão do trabalho realizado.

5.2 CONCLUSÃO

O objetivo principal previsto para o projeto era apresentar um protótipo que pudesse controlar o funcionamento de um compressor encontrado em um refrigerador doméstico. Para alcançar este objetivo foi necessário identificar quais componentes seriam suficientes para resolver o problema proposto pelo projeto. Os componentes foram não só identificados como também escolhidos para desempenhar de maneira mais eficiente possível sua função em um protótipo. Apesar de alguns componentes utilizados durante o projeto terem uma capacidade acima da requerida pelo projeto, como por exemplo o microprocessador Atmega-8A, existem no mercado componentes mais baratos e igualmente aptos a gerenciar o projeto.

Além do plano teórico, o projeto conseguiu apresentar um protótipo real e funcional bastante parecido com o produto necessário para realizar as funções previstas no trabalho. Os resultados gerados pelos testes de cada componente foram satisfatórios. Com exceção do sensor utilizado para sentir o campo magnético do compresor, motivos já explicados no capítulo anterior, os componentes desempenharam suas funções bem próximas do que foi projetado.

Os resultados positivos obtidos neste projeto demonstram a viabilidade da continuidade do projeto dado o benefício a nível nacional, descrito na introdução deste documento, possível para o equipamento.

O projeto estima que um refrigerador doméstico, a cada acionamento, fique ligado em média 18 minutos e permaneça desligado mais 51 minutos até sua próxima partida. Estes valores estão de acordo os dados da revisão bibliográfica, um percentual de 26% do tempo para o compressor acionado e 74% desligado.

Com os valores do parágrafo acima, levando em conta um horário de pico de uma hora, estima-se que o compressor deve ser acionado, em média, apenas uma vez durante o horário de pico de demanda.

Para as estimativas do projeto, um compressor tem, em média, uma potência de 150 W. Pela revisão bibliográfica, percebe-se que em breve teremos mais de 55 milhões de refrigeradores no país caso a tendência do crescimento da venda deste eletrodoméstico se mantenha.

Com esses dados, estima-se devido à atuação do equipamento, caso este esteja presente em todos os refrigeradores do país, que durante o horário de pico de demanda haja uma redução da carga demandada em até 8,125GW (7,3% da capacidade de geração instalada no país em 2012).

Ou seja, deslocar o consumo de energia elétrica dos refrigeradores pode acarretar em não ter que acionar o equivalente a cinco termelétricas de Suape, a maior termelétrica do mundo, cuja capacidade de geração é de 1452 MW e que custou aos cofres públicos R\$ 2 bilhões. O impacto pode ser de uma economia total de até R\$10 bilhões, sem contar o benefício ambiental da não queima de combustível fóssil para esta energia gerada.

Os autores percebem também que a capacidade de atender o crescimento da demanda energética de um país é parte integrante de um planejamento estratégico da nação em todos os setores, sejam econômicos, sociais ou ambientais, e que este atendimento pode ser feito de várias maneiras: extendendo o parque gerador, reduzindo consumos, aumentando a eficiência de equipamentos, reduzindo a demanda de ponta, entre outros.

Neste cenário o equipamento proposto possui papel fundamental, visto que seu potencial de impacto é quase tão grande quando o aumento anual da demanda energética de acordo com dados da revisão bibliográfica.

Os autores consideram bem sucedido o projeto dentro dos objetivos iniciais e continuariam o desenvolvimento do equipamento caso houvessem demandas governamentais para tal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL, *Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética (ciclo 2005/2006)*. Brasília, ANEEL: 121.
- Cardoso, R.B, Nogueira, L.A.H, *Estimativa do consumo de energia elétrica em refrigeradores no setor residencial brasileiro*, (2007).
- Jannuzzi, G.M, *Cost-benefit analysis of a refrigerator replacement program for low-income households in brazil*, USAID (2007)
- Vendrusculo, E.A, Queiroz, G. C, e al, *Life cycle cost analysis of energy efficiency design options for refrigerators in Brazil*, (2007)
- Empresa de Pesquisa Energética, *Balanco Energético Nacional 2003 – 2011*
- Reportagem em site, alvaroaugusto.blogspot.com.br/2011/07/producao-de-energia-termoeletrica-no.html, Alvaro August (2011), visitado no dia 19 de Abril de 2012
- Cordeiro, M. L. R. (2006). *Pesquisa de Campo - Eletrobrás/PROCEL*. Personal communication to G. M. Jannuzzi May/19/2006.
- ANEEL, Lista de Projetos do Programa de Eficiência Energética de 2010
- Silva Junior, H.X, *Aplicação das Metodologias de Análise Estatística e de Análise do Custo do Ciclo de Vida (ACCV) para o Estabelecimento de Padrões de Eficiência Energética: Refrigeradores Brasileiros*, Campinas (2005)
- TreeHugger, *How Oklahoma Cut Peak Energy Use by 33%*, (2011)
- BusinessGreen, *Volatile energy prices demand new form of management*, (2010)
- Queensland Government, *Energy Conservation and Demand Management Program*, (2010)
- Tutoriais e fóruns Arduino, consultas no site <http://arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>, visitado no dia 01 de Maio de 2012
- Reportagem em site, economia.terra.com.br/noticias/noticia.aspx?idNoticia=20120124_1716_T_RR_807_65038, visitado no dia 20 de Abril de 2012
- Reportagem em site, <http://www.jb.com.br/economia/noticias/2011/11/23/aneel-aprova-tarifa-de-energia-eletrica-por-horario-de-consumo/>, visitado no dia 20 de Abril de 2012
- Reportagem em site, www.redebrasilatual.com.br/temas/economia/2011/01/consumo-medio-mensal-de-energia-eletrica-bate-recorde-em-2010, visitado no dia 20 de Abril de 2012
- Reportagem em site, www.greatachievements.org, visitado no dia 22 de Abril de 2012
- Reportagem em site, <http://sandbox.asme.org/groups/educational-resources/achievements-in-mechanical-engineering>, visitado no dia 22 de Abril de 2012

Notas de aula de Instalações Termomecânicas I, Capítulo 3, Fluidos Refrigerantes, Professor João M. D. Pimenta

Ficha Técnica Motorola, *Amplifier Transistors NPN Silicon P2N2222A*

Ficha Técnica Atmel, *8bit AVR with 8kbytes in system Programmable Flash, Atmega8A*

Ficha Técnica Maxim, *+5V Powered Multichanel R2-232, Drivers/Receivers MAX232*

Ficha NXP Semiconductors, *Clock and Calendar with 240x8-bit RAM, PCF8583*

Roland Brüniger, *Modified A++ - Standard Refrigerator with 30% Reduction of Energy Consumption*, Copenhagen (2011)

CARMEIS, Dean Willian M., Os Efeitos da Diversidade de Tensões de Distribuição no Setor Elétrico Brasileiro. Estudo de Caso do Refrigerador Doméstico, Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE/DMCSI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2002, 108 p. Tese (Mestrado)

ONS, Consulta no site www.ons.org.br visitado no dia 20 de Abril de 2012

Gutierrez, M.S.C., Silveira Junior, V., *Estudo experimental de um dispositivo de condensação evaporativa aplicado a refrigeradores domésticos*, Porto Alegre 2010

DOE, U.S. Department of Energy, *Technical Support Document: Energy Efficiency Standards for consumer products: Refrigerators, Refrigerators-Freezers, & Freezers*, July 1995, 391 p.

1. ALGORITMOS DOS TESTES

1.1 TESTE DO MICROPROCESSADOR, RTC E PORTA SERIAL

```
#include <Wire.h> // necessary, or the application won't build properly
#include <stdio.h>
#include <PCF8583.h>

/*****

* read/write serial interface to PCF8583 RTC via I2C interface
* Arduino analog input 5 - I2C SCL (PCF8583 pin 6)
* Arduino analog input 4 - I2C SDA (PCF8583 pin 5)
* You can set the type by sending it YYMMddhhmmss;
*****/

int correct_address = 0;
PCF8583 p (0xA0);
void setup(void){
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("booting...");
  Serial.println(" done");
}
void loop(void){
  if(Serial.available() > 0){
    p.year= (byte) ((Serial.read() - 48) *10 + (Serial.read() - 48)) + 2000;
    p.month = (byte) ((Serial.read() - 48) *10 + (Serial.read() - 48));
    p.day = (byte) ((Serial.read() - 48) *10 + (Serial.read() - 48));
    p.hour = (byte) ((Serial.read() - 48) *10 + (Serial.read() - 48));
    p.minute = (byte) ((Serial.read() - 48) *10 + (Serial.read() - 48));
    p.second = (byte) ((Serial.read() - 48) * 10 + (Serial.read() - 48)); //
    if(Serial.read() == ';'){
      Serial.println("setting date");
      p.set_time();
    }
  }
  p.get_time();
  char time[50];
  sprintf(time, "%02d/%02d/%02d %02d:%02d:%02d",
    p.year, p.month, p.day, p.hour, p.minute, p.second);
  Serial.println(time);
  delay(3000);
}
```

1.2 TESTE DO RELÉ

/*

Código para identificar acionamento do Relé

Caso o botão 1 for acionado, o programa deve ligar o LED e acionar o relé e enviar a informação de volta a porta serial com uma mensagem.

*/

// set pin numbers:

const int buttonPin = 7; // Pino em que o botão está conectado ao microprocessador

const int ledPin = 8; // Pino em que o LED está conectado ao microprocessador

const int relePin = 13; // Pino em que o Relé está conectado ao microprocessador

// variables will change:

int buttonState = 0;

int flag = 0;

void setup() {

 // start serial port at 9600 bps:

 Serial.begin(9600);

 // initialize the LED pin as an output:

 pinMode(ledPin, OUTPUT);

 pinMode(relePin, OUTPUT);

 // initialize the pushbutton pin as an input:

 pinMode(buttonPin, INPUT);

}

void loop(){

 // read the state of the pushbutton value:

 buttonState = digitalRead(buttonPin);

 // check if the pushbutton is pressed.

 // if it is, the buttonState is HIGH:

 if (buttonState == HIGH) {

 // turn LED on:

 digitalWrite(ledPin, HIGH);

 digitalWrite(relePin, HIGH);


```

Serial.println ("Botao 1 pressionado, Relé assionado");

}

else {

    // turn LED off:

    digitalWrite(ledPin, LOW);

    digitalWrite(relePin, LOW);

}

}

```

1.3 ALGORITMOS EMBARCADOS

1.3.1 Modo de Aprendizado

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
/*
```

Brasilia 12 de Junho de 2012

Universidade de Brasilia

Departamento de Engenharia Mecânica

Alunos: Henrique Pereira e Felipe Borges

Código Computacional para o modo de aprendizado do Projeto de Graduação 2

A ideia do código é fazer com que o algoritmo identifique quando um compressor de refrigerador é acionado. Ao mesmo ser acionado, o algoritmo deve salvar na memória o tempo em que ele ficou ligado.

Além disso, ao compressor ser desligado e novamente ligado, o algoritmo deve identificar o tempo em que o compressor ficou ligado. Ao final do período de aprendizado (variando entre algumas horas a um dia) o algoritmo

deve sair com o valor das médias do tempo ligado e desligado do compressor.

```
*/
```

```
//Declarar quais são os pinos usados neste modo
```

```
const int sensorPin = 7; // Pino no qual o sensor, que identifica se o compressor está sendo acionado, está ligado
```

```
//const int rtcPin = A4; // Pino no qual o RTC está ligado ao microprocessador
```

```
const int LEDPin = 13; // Pino no qual o LED está conectado e indicará quando o compressor estiver ligado
```

```
// Variáveis
```

```
int sensorValue = LOW; // Valor do sensor, pode ser HIGH(Compressor Ligado) ou LOW (Compressor Desligado)
```

```
long previousMillis = 0; // Variável que salva o último horário em que o compressor foi ligado ou desligado
```

```
int var_controle = 0; // Apenas uma variável de controle
```

```
int i = 0; // Contador da posição do vetor dos tempos off
```

```

//long tempo_compressor_off[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}; // Vetor que salvará os tempos em
que o compressor ficou desligado

long* tempo_compressor_off; // Vetor que salvará os tempos em que o compressor ficou desligado

long media_compressor_off = 0; // Variável que salvará a média do tempo que o compressor ficou desligado

//long tempo_compressor_on[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}; // Vetor que salvará os tempos em
que o copressor ficou ligado

long* tempo_compressor_on;

long media_compressor_on = 0; // Variável que salvará a média do tempo que o copressor ficou ligado

//long tempo_aprendizado = 86400000 ;// Variável que define o tempo de aprendizado (24 horas em
milisegundos )

long tempo_aprendizado = 30000 ;// Variável que define o tempo de aprendizado (1 minuto em milisegundos )

long parcial = 0;

long soma = 0;

void setup() {

    Serial.begin(9600);          // Inicializando a porta serial

    Serial.println ("Este Algoritmo testa o Modo de Aprendizado utilizado no Projeto de Graduacao 2 dos alunos
Henrique Pereira e Felipe Borges");

    // pinMode(sensorPin,INPUT);    // O Pino do sensor é um INPUT, o microprocessador vai receber as
informação do sensor.

    // pinMode(rtcPin,INPUT);      // O Pino do RTC é um INPUT, o microprocessador vai receber as
informações do RTC.

    // pinMode(LEDPin,OUTPUT);     // O Pino do LED será um OUTPUT, o microprocessador que o irá
acionar.

    Serial.print ("O Tempo de aprendizado para este teste e de: ");

    Serial.println (tempo_aprendizado);

}

void loop() {

    unsigned long currentMillis = millis(); // Salva qual o tempo atual, quantos segundos se passaram desde a
iniciação do código.

    Serial.print ("Desde o inicio do programa, passou-se: ");

    Serial.println (currentMillis);

    if (currentMillis <= tempo_aprendizado) { // IF 1

        sensorValue = digitalRead(sensorPin); // Lê o estado atual do sensor

        if (sensorValue == HIGH && var_controle == 0) {    // IF 2

            //Deixar o LED ON enquanto o compressor estiver funcionando

            digitalWrite(LEDPin,HIGH);

            tempo_compressor_off[i] = currentMillis - previousMillis;

            previousMillis = currentMillis;

            Serial.println ("Compressor acionado!");

```

```

Serial.print ("Segue abaixo os tempos em que o compressor ficou desligado:");
for (int a=0; a<=i; a++) {
    Serial.print(tempo_compressor_off[a]);
    Serial.print(",");
}
Serial.println(".");
var_controle = 1;
i = i+1;
}

if (sensorValue == LOW && var_controle ==1) {      // IF 3
    Serial.println ("Compressor desligado!");
    tempo_compressor_on[i-1] = currentMillis - previousMillis;
    previousMillis = currentMillis;

    Serial.println ("Segue abaixo os tempos em que o compressor ficou ligado:");
    for (int a=0; a<i; a++) {
        Serial.print(tempo_compressor_on[a]);
        Serial.print(",");
    }
    Serial.println(".");
    //Deixar o LED OFF enquanto o compressor estiver desligado
    digitalWrite(LEDPin,LOW);

    var_controle = 0;

} // Fecha o ciclo do IF 3

} // Fecha o ciclo do primeiro IF 1

if (currentMillis > tempo_aprendizado && var_controle != 5) { // IF 4

    // Agora segue uma rotina para testar se o algoritmo conseguiu salvar as médias.
    // A ideia é acionar o LED durante o tempo médio que o compressor passou ligado.
    Serial.println ("Tempo de Aprendizado finalizado. Seguem os dados obtidos");
    Serial.print ("Vetor com os tempos em que o compressor ficou desligado:");
    for (int a=0; a<=i; a++) {
        soma = tempo_compressor_off[a] + parcial;

```

```

parcial = soma;
Serial.print(tempo_compressor_off[a]);
Serial.print(",");
}
Serial.println(".");

Serial.print ("O valor da media do tempo em que o compressor ficou desligado e:");
media_compressor_off = soma/(i+1);
Serial.println(media_compressor_off);

soma = 0;
parcial = 0;

// Agora segue uma rotina para testar se o algoritmo conseguiu salvar as médias.
// A ideia é acionar o LED durante o tempo médio que o compressor passou ligado.
Serial.print ("Vetor com os tempos em que o compressor ficou ligado: ");
for (int a=0; a<=i; a++) {
soma = tempo_compressor_on[a] + parcial;
parcial = soma;
Serial.print(tempo_compressor_on[a]);
Serial.print(",");
}
Serial.println(".");

Serial.print ("O valor da media do tempo em que o compressor ficou ligado e :");
media_compressor_on = soma/(i+1);
Serial.println(media_compressor_on);

soma = 0;
parcial = 0;
var_controle = 5;
}

delay(2000);
} // Fecha o void LOOP

```

1.3.2 Modo de Aprendizado com RTC

```
#include <Wire.h>
#include <stdio.h>
#include <PCF8583.h>
/*
Brasília 12 de Junho de 2012
Universidade de Brasília
Departamento de Engenharia Mecânica

Alunos: Henrique Pereira e Felipe Borges

//Declarar quais são os pinos usados neste modo
#define SENSOR_PIN 7 // Pino no qual o sensor, que identifica se o compressor está sendo acionado, está ligado
#define LED_PIN 13 // Pino no qual o LED está conectado e indicará quando o compressor estiver ligado

#define MAX_AMOSTRAS 10

#define TEMPO_APRENDIZADO 30

// Variáveis
// Variáveis para pegar a hora com o RTC
int correct_address = 0;
PCF8583 p (0xA0);

long To = 0;
int mediaJaCalculada = 0;

int sensorValue = LOW; // Valor do sensor, pode ser HIGH(Compressor Ligado) ou LOW (Compressor Desligado)
unsigned long currentMillis = 0; // Variável que salva o horário em que o compressor foi ligado ou desligado
long previousMillis = 0; // Variável que salva o último horário em que o compressor foi ligado ou desligado
int varControle = 0; // Apenas uma variável de controle
int i = 0; // Contador da posição do vetor dos tempos off

long mediaCompressorOff;
long mediaCompressorOn;
long vetorAmostrasOff[MAX_AMOSTRAS]; // Vetor que salvará os tempos em que o compressor ficou desligado
long vetorAmostrasOn[MAX_AMOSTRAS]; // Vetor que salvará os tempos em que o compressor ficou ligado
//-----
void calculaMedia(void)
{
    long soma = 0;

    // Agora segue uma rotina para testar se o algoritmo conseguiu salvar as médias.
    // A ideia é acionar o LED durante o tempo médio que o compressor passou ligado.
    Serial.println ("Tempo de Aprendizado finalizado. Resultados:");

    // Serial.print ("1. Vetor intervalos do compressor desligado:");
    for (int a=0; a < i; a++) {
        soma += vetorAmostrasOff[a];
        Serial.print(vetorAmostrasOff[a]);
        Serial.print(",");
    }
    Serial.println(".");
    Serial.print ("Media compressor desligado:");
    mediaCompressorOff = soma/i;
    Serial.println(mediaCompressorOff);
    soma = 0;

    // Agora segue uma rotina para testar se o algoritmo conseguiu salvar as médias.
    // A ideia é acionar o LED durante o tempo médio que o compressor passou ligado.

    // Serial.print ("2. Vetor intervalos do compressor ligado: ");
    for (int a=0; a < i; a++) {
        soma += vetorAmostrasOn[a];
        Serial.print(vetorAmostrasOn[a]);
        Serial.print(",");
    }
    Serial.println(".");
```

```

    Serial.print ("Media compressor ligado :");
    mediaCompressorOn = soma/i;
    Serial.println(mediaCompressorOn);
}
void setup() {

    Serial.begin(9600);          // Inicializando a porta serial
    // Serial.println ("Modo de Aprendizado com RTC. Henrique Pereira e Felipe Borges");
    pinMode(SENSOR_PIN,INPUT);    // O Pino do sensor é um INPUT, o microprocessador vai receber as informações do
    sensor.
    pinMode(LED_PIN ,OUTPUT);    // O Pino do LED será um OUTPUT, o microprocessador que o irá acionar.
    Serial.print ("Tempo de Aprendizado:");
    Serial.println(TEMPO_APRENDIZADO);
    p.get_time();

    Serial.print ("Hora inicial: ");
    Serial.print (p.hour);
    Serial.print (p.minute);
    Serial.println (p.second);

    To = 3.6*(p.hour*1000) + (6*(p.minute*10)) + p.second;

}
void loop() {
    p.get_time();
    currentMillis = 3.6*(p.hour*1000) + (6*(p.minute*10)) + p.second - To;
    if (currentMillis < 0) {
        currentMillis += 86400;
    }
    if (currentMillis <= TEMPO_APRENDIZADO) { // IF 1
        sensorValue = digitalRead(SENSOR_PIN); // Lê o estado atual do sensor
        if ( (sensorValue == HIGH ) && (varControle == 0) ) { // IF 2

            //Deixar o LED ON enquanto o compressor estiver funcionando
            digitalWrite(LED_PIN,HIGH);
            vetorAmostrasOff[i] = currentMillis - previousMillis;
            if (vetorAmostrasOff[i] <0) {
                vetorAmostrasOff[i] += 86400;
            }
            previousMillis = currentMillis;
            Serial.println ("Compressor acionado!");

            varControle = 1;
            i += 1;
        }
        if ( (sensorValue == LOW) && (varControle ==1) ) { // IF 3
            //Deixar o LED OFF enquanto o compressor estiver desligado
            digitalWrite(LED_PIN,LOW);
            Serial.println ("Compressor desligado!");
            vetorAmostrasOn[i-1] = currentMillis - previousMillis;
            if (vetorAmostrasOn[i-1] <0) {
                vetorAmostrasOn[i-1] += 86400;
            }
            previousMillis = currentMillis;
            varControle = 0;
        } // Fecha o ciclo do IF 3
    } else {
        if ( mediaJaCalculada ==0 ) {
            varControle = 0;
            mediaJaCalculada=1;
            calculaMedia();
            // previousMillis = currentMillis;
            // Serial.println("Inicio do Modo Normal");
        }
    }
}
} // Fecha o void LOOP

```

1.3.3 Modo Normal

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <stdio.h>
```

```
/*
```

Brasilia 05 de Junho de 2012

Universidade de Brasilia

Departamento de Engenharia Mecânica

Alunos: Henrique Pereira e Felipe Borges

Código Computacional para o modo de normal do Projeto de Graduação 2

A ideia do código é fazer com que o algoritmo identifique quando é a hora ótima de acionamento do compressor permitindo que o mesmo fique o maior tempo possível desligado durante o horário de pico da rede.

Este algoritmo faz uso de duas informações contidas no Modo de Aprendizado do projeto, o tempo_compressor_on

e o tempo_compressor_off, tempo em que o compressor fica ligado a cada partida, em média, e o tempo que o compressor

fica desligado entre cada partida, em média, respectivamente.

O algoritmo tem como objetivo acionar o relé quando a hora for a mais propícia. Para saber o horário o código faz uso do RTC.

Além disso o algoritmo tem que identificar a última vez que o compressor foi desligado para saber quanto tempo falta, em média,

para um novo acionamento do compressor e portanto necessitando das informações do sensor.

```
*/
```

```
//Declarar quais são os pinos usados neste modo
```

```
const int sensorPin = 7; // Pino no qual o sensor, que identifica se o compressor está sendo acionado, está ligado
```

```
const int relePin = 8; // Pino no qual Relé está ligado ao microprocessador e que irá acionar a carga de 60W
```

```
const int LEDPin = 13; // Pino no qual o LED está conectado e indicará quando o compressor estiver ligado
```

```
// Variáveis
```

```
int sensorValue = LOW; // Valor do sensor, pode ser HIGH(Compressor Ligado) ou LOW (Compressor Desligado)
```

```
long media_compressor_on = 5000; // Valor retirado do tempo de aprendizado, nesse exemplo, igual a 5 segundos em milisegundos.
```

```
long media_compressor_off = 15000; // Valor retirado do tempo de aprendizado, nesse exemplo igual a 15 segundos em milisegundos.
```

```
long hora_ultimo_acionamento = 15000; //Variável que vai indicar qual foi a última vez que o compressor desligou
```

```
int var_controle = 0; // Contador da posição do vetor dos tempos off
```

```
long hora_de_pico = 30000; // Início do horário de pico (18 horas) em mili segundos. Nesse caso será 30 segundos
```

```
int proporcao_acionamento = 0; // Variável que vai definir quanto tempo o compressor deve ficar ligado de maneira forçada
```

```
long tempo_compressor_on = 0; // Tempo que o compressor vai ficar ligado de maneira forçada
```

```
int ligar_compressor = 0; // Variável de controle para ligar o compressor
```

```

void setup() {
    Serial.begin(9600);          // Inicializando a porta serial

    Serial.println("Este Algoritmo testa o Modo Normal utilizado no Projeto de Graduacao 2 dos alunos Henrique
Pereira e Felipe Borges: ");

    Serial.print("Do algoritmo anterior temos que a media do compressor ligado e de :");
    Serial.println(media_compressor_on);

    Serial.print("Em seguida, a media do compresor desligado e de: ");
    Serial.println(media_compressor_off);

    Serial.print("E por ultimo, os milisegundos equivalentes a hora de pico sao: ");
    Serial.println(hora_de_pico);

    pinMode(sensorPin,INPUT);    // O Pino do sensor é um INPUT, o microprocessador vai receber as
informação do sensor.

    // pinMode(relePin,OUTPUT);    // O Pino do Relé é um OUTPUT, o microprocessador vai receber as
informação do sensor.

    pinMode(LEDPin,OUTPUT);     // O Pino do LED será um OUTPUT, o microprocessador que o irá acionar.


    Serial.println("Inicia-se portanto o horario NORMAL.....");
}

void loop() {
    // Primeiramente o código deve, constantemente, fazer a leitura de que horas são.
    unsigned long currentMillis = millis(); // Transforma o tempo em segundos.
    Serial.print("Desdo o inicio do modo normal, passou-se: ");
    Serial.println(currentMillis);

    // Em seguida, precisa-se saber qual foi a última vez que o compressor foi desligado.
    sensorValue = digitalRead(sensorPin); // Lê o estado atual do sensor

    // Primeiramente é preciso saber quando ele foi ligado através da troca do sinal enviado ao microprocessador.
    if (sensorValue == HIGH && var_controle == 0) {
        digitalWrite(LEDPin,HIGH); //Acionar o rele e ligar o compressor
        Serial.println("O Compressor esta em fucionamento! ");
        var_controle = 1; // Indica que ele passou a ficar ligado
    } // Fecha o ciclo do IF

    // Agora a próxima vez que ele passar a ter um sinal LOW (de desligado) significa que ele veio de um momento
em que estava ligado.
    if (sensorValue == LOW && var_controle == 1) {
        hora_ultimo_acionamento = currentMillis;
        digitalWrite(LEDPin,LOW); //Acionar o rele e ligar o compressor
        Serial.println("O Compressor foi desligado. ");
        Serial.print("O horario em que o mesmo foi desligado pelo ultima vez e de: ");
        Serial.print(hora_ultimo_acionamento);
        Serial.println("milisegundos ");
        var_controle = 0;
    } // Fecha o ciclo do IF
}

```



```

    if (hora_ultimo_acionamento + media_compressor_off + medio_compressor_on > hora_de_pico &&
        hora_ultimo_acionamento < hora_de_pico && ligar_compressor == 0) { // Se a última vez que o compressor foi
        acionado mais o tempo necessário, em média, para o //próximo acionamento mais o tempo médio de
        acionamento do compressor for maior que o horário de pico, é sinal de que não devemos esperar, e sim acionar o
        compressor de maneira forçada.

        // Mas tem que ver qual a diferença entre quanto falta para ele ligar e o horário de pico

        proporcao_acionamento = ( hora_de_pico - media_compressor_off -
        media_compressor_on)/hora_ultimo_acionamento ; //

        tempo_compressor_on = proporcao_acionamento* media_compressor_on;

        ligar_compressor = 1;

        //Avaliar esta proporção é importante para evitar um acionamento muito grande do compressor e uma
        temperatura no interior da geladeira podendo ocasionar o congelamento dos alimentos.

        //Portanto basta agora acionar o compressor durante este tempo. Mas somente quando
    }

    //Dado que sabemos agora quanto tempo o compressor deve ficar ligado vamos o acionar no tempo limite para
    entrar no horário de pico

    if (currentMillis + tempo_compressor_on + 30 > hora_de_pico && ligar_compressor == 1) { // Isto significa
    que o compressor irá ligar e desligar 30 segundos antes do horário de pico

        Serial.println("O Compressor acaba de ser acionado forcadamente!!");

        digitalWrite(relePin,HIGH); //Acionar o rele e ligar o compressor

        digitalWrite(LEDPin,HIGH); //Ligar o LED enquanto isso

        delay(tempo_compressor_on); //Deixar o compressor acionado

        Serial.println("Final do acionamento do compressor!");

        digitalWrite(relePin,LOW); //Desligar o compressor

        digitalWrite(LEDPin,LOW); // Desligar o LED

        ligar_compressor = 0; // Reinicia a variável
    }

    delay(2000);
}

```

1.3.4 Modo Normal com RTC

```
#include <Wire.h>
#include <stdio.h>
#include <PCF8583.h>

/*
Brasilia 05 de Junho de 2012
Universidade de Brasilia
Departamento de Engenharia Mecânica
Alunos: Henrique Pereira e Felipe Borges

Este algoritmo faz uso de duas informações contidas no Modo de Aprendizado do projeto, o tempo_compressor_on
e o tempo_compressor_off, tempo em que o compressor fica ligado a cada partida, em média, e o tempo que o compressor
fica desligado entre cada partida, em média, respectivamente.

O algoritmo tem como objetivo acionar o relé quando a hora for a mais propícia. Para saber o horário o código faz uso do
RTC.

Além disso o algoritmo tem que identificar a última vez que o compressor foi desligado para saber quanto tempo falta, em
média,

para um novo acionamento do compressor e portanto necessitando das informações do sensor.

*/

PCF8583 p (0xA0);

#define SENSOR_PIN 7    // Pino no qual o sensor, que identifica se o compressor está sendo acionado, está ligado
#define RELE_PIN 8      // Pino no qual o LED está conectado e indicará quando o compressor estiver ligado
#define LED_PIN 13      // Pino no qual o LED está conectado e indicará quando o compressor estiver ligado
#define HORA_PICO 30    // Variável que define o Horário de Pico

// Variáveis -----
// Variáveis para pegar a hora com o RTC
int correct_address = 0;
int sensorValue = LOW; // Valor do sensor, pode ser HIGH(Compressor Ligado) ou LOW (Compressor Desligado)
unsigned long currentMillis;
long previousMillis;    // Variável que salva o último horário em que o compressor foi ligado ou desligado
int varControle = 0;    // Apenas uma variável de controle
long mediaCompressorOff; // Variável que salvará a média do tempo que o compressor ficou desligado
long mediaCompressorOn; // Variável que salvará a média do tempo que o compressor ficou ligado

long To;
int proporcaoAcionamento; // Variável que vai definir quanto tempo o compressor deve ficar ligado de maneira forçada
long tempoCompressorOn;    // Tempo que o compressor vai ficar ligado de maneira forçada
int ligarCompressor = 0;    // Variável de controle para ligar o compressor
long horaUltimoAcionamento; // Variável que define o Horário de último acionamento do compressor

// -----
void processaModoNormal() {
    p.get_time();
    currentMillis = 3.6*(p.hour*1000) + (6*(p.minute*10)) + p.second - To;
    if (currentMillis > HORA_PICO) { // Reinicia a contagem ao trocar o dia.
```

```

To += currentMillis;
Serial.println("Reiniciando o horario Normal...");
}

sensorValue = digitalRead(SENSOR_PIN); // Lê o estado atual do sensor
if ( (sensorValue == HIGH) && (varControle == 0) ) { // IF 1
    digitalWrite(LED_PIN,HIGH);
    Serial.println("Compressor On. ");
    varControle = 1; // Indica que ele passou a ficar ligado
} // Fecha o ciclo do IF 1

// Agora a próxima vez que ele passar a ter um sinal LOW (de desligado) significa que ele veio de um momento em que
estava ligado.
if ( (sensorValue == LOW) && (varControle == 1) ) { // IF 2
    horaUltimoAcionamento = currentMillis;
    digitalWrite(LED_PIN,LOW);
    Serial.println("Compressor Off.");
    varControle = 0;
} // Fecha o ciclo do IF 2

if ( (horaUltimoAcionamento + mediaCompressorOff >= HORA_PICO) && (horaUltimoAcionamento < HORA_PICO)
&& (ligarCompressor == 0) ) { // Se a última vez que o compressor foi acionado

    // mais o tempo necessário, em média, para o próximo acionamento for maior que o horário de pico, é sinal de que não
    devemos esperar, e sim acionar o compressor de maneira forçada.

    // Mas tem que ver qual a diferença entre quanto falta para ele ligar e o horário de pico

    proporcaoAcionamento = HORA_PICO - horaUltimoAcionamento ; // Quando essa subtração for igual, é sinal de que o
    compressor deve ser ligado o maior tempo possível, media_compressor_on.

    tempoCompressorOn = proporcaoAcionamento*mediaCompressorOn/mediaCompressorOff;
    ligarCompressor = 1;
    Serial.print("Em breve, acionamento Compressor durante:");
    Serial.println(tempoCompressorOn);

    //Avaliar esta proporção é importante para evitar um acionamento muito grande do compressor e uma temperatura no
    interior da geladeira podendo ocasionar o congelamento dos alimentos.

    //Portanto basta agora acionar o compressor durante este tempo. Mas somente quando
}

//Dado que sabemos agora quanto tempo o compressor deve ficar ligado vamos o acionar no tempo limite para entrar no
horário de pico
if ( (currentMillis + tempoCompressorOn +1 > HORA_PICO) && (ligarCompressor == 1) ) { // Isto significa que o
compressor irá ligar e desligar 30 segundos antes do horário de pico

    Serial.println("Compressor acionado forcadamente.");
    digitalWrite(RELE_PIN,HIGH); //Acionar o rele e ligar o compressor
    digitalWrite(LED_PIN,HIGH); //Ligar o LED enquanto isso
    delay(3000*tempoCompressorOn); //Deixar o compressor acionado
// Serial.println("Fim do acionamento forçado.");
    digitalWrite(RELE_PIN,LOW); //Desligar o compressor
    digitalWrite(LED_PIN,LOW); // Desligar o LED
    ligarCompressor = 0; // Reinicia a variável
    horaUltimoAcionamento = 0; // Reseta o ultimo acionamento
}

```

```

} // Fecha o void
// -----

void setup() {
  pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RELE_PIN, OUTPUT);
  pinMode(SENSOR_PIN, INPUT);
  Serial.begin(9600);      // Inicializando a porta serial
  Serial.println ("Projeto de Graduacao 2 - Henrique e Felipe");
  mediaCompressorOff = 15;
  mediaCompressorOn = 5;
  Serial.print ("Hora de Pico: ");
  Serial.println (HORA_PICO);
  p.get_time();
  Serial.print ("Hora inicial: ");
  Serial.print (p.hour);
  Serial.print (p.minute);
  Serial.println (p.second);

  To = 3.6*(p.hour*1000) + (6*(p.minute*10)) + p.second;

}

// -----

void loop() {

  processaModoNormal();

}

```